



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

MARIA PUHTILA
AURINKOVOIMALOIDEN KAUPALLISTUMISEN
ENNUSTAMINEN
Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneuvoston kokouksessa 19. elokuuta 2009

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

PUHTILA, MARIA: Aurinkovoimaloiden kaupallistumisen ennustaminen

Diplomityö, 65 sivua, 2 liitesivua

Toukokuu 2011

Pääaine: Sähkövoimatekniikka

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: uusiutuvat energialähteet, aurinkosähkö, fossiiliset polttoaineet, energian tuotanto, sähkön tuotantokustannus, valosähköinen ilmiö

Maailman energiantuotanto perustuu vielä nykyisin suurelta osin fossiilisiin polttoaineisiin. Öljy, maakaasu ja hiili ovat suurimmat energiantuotantolähteet nykyisin, yli 80 % maailman käytetystä energiasta tuotetaan näiden avulla. Etenkin hiili on hyvin tärkeä energialähde sähköntuotannossa, sillä hiililauhdevoimaloilla tuotetaan hyvin suuri osa maailman sähköenergiasta.

Energiantuotantosektorilla on kuitenkin tapahtumassa murros. Koko 2000-luvun ajan uusiutuvat energialähteet ovat kasvattaneet osuuttaan sähköenergian tuotannossa. Etenkin vesivoima, tuulivoima sekä aurinkosähkö ovat mielenkiinnon kohteina, sillä niiden etuina ovat muun muassa kapasiteetin koko, riittävyys sekä se, että niitä on saatavilla ympäri maapalloa paikasta riippumatta.

Riippuvuutta fossiilisista energialähteistä halutaan vähentää ja yksi keino on lisätä uusiutuvien energialähteiden tuotantokapasiteettia. Lisäksi huoli ilmastonmuutoksesta vaikuttaa osaltaan uusiutuvien energialähteiden kapasiteetin kehitykseen. Uusiutuvien energialähteiden kapasiteetin kasvu ja kasvun ennusteet ovat huimia. Tässä työssä mielenkiinto kohdistui kuitenkin pääasiassa aurinkosähkön kapasiteettiin ja sen tuotantokustannuksiin.

Aurinkosähkön kapasiteetti on ollut useita vuosia melko pieni, mutta 2000-luvun puolella aurinkosähkön tuotantokapasiteetin kasvussa on tapahtunut merkittävä muutos. Aurinkosähkön tuotantokapasiteetin kasvu on tällä hetkellä yli 30 % vuodessa ja ennusteet tuotantokapasiteetin kasvun jatkumiseksi ovat hyvin positiivisia. Kapasiteetin kasvun myötä myös aurinkosähkön tuotantokustannukset laskevat. Tuotantokustannukset ovatkin yksi tärkeimmistä tekijöistä aurinkosähkön kaupallistumiseen ja sitä kautta sen käytön yleistymiseen.

Työssä käydään läpi miten aurinkosähkön tuotantokustannusten tuleva kehitys laskeaan ja huomataan, että oppimiskertoimella on suuri vaikutus aurinkosähkön tuotantokustannusten kehitykseen. Aurinkosähkön tulevaisuuden ennustettuja tuotantokustannuksia verrataan hiililauhteen tuotantokustannuksiin, joita voidaan pitää aurinkosähkön kaupallistumisen vertailukohtana. Tarkoituksena on laskea ajankohta jolloin tuotantokustannukset leikkaavat. Tulos on karkea arvio aurinkosähkön kaupallistumisen ajankohdasta, mutta antaa kuitenkin hyvän kuvan aurinkosähkön tulevaisuudesta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

PUHTILA, MARIA: Forecasting the market penetration of solar power

Masters of Science Thesis, 65 pages, 2 appendix pages

May 2011

Major: Power Engineering

Examiner: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: Renewable energy sources, solar power, photovoltaics, Fossil fuels, energy production, electricity production cost

World energy production today is mostly based on fossil fuels. Oil, natural gas and coal are the biggest sources of power production, more than 80 % world's energy consumption is produced of these sources. Especially coal is very important energy source because coal-fired power plants produce most of the electric energy in the world.

However, revolution will happen in the sector of power production. Renewable energy sources have increased their share in energy production during the entire 2000 century. Hydroelectric, wind and photovoltaic power are the subject of great interest. The reasons for this are for example the size of their capacity, sufficiency and the fact that they are available around the world.

Mankind wants to reduce our dependence on fossil energy sources. One way is to increase the capacity of renewable energy. Also concern about climate change has an influence on renewable energy capacity development. Capacity growth and forecasts are enormous. The main interest of this work focuses on the capacity of photovoltaic and its cost of production.

Capacity of photovoltaic power has been insignificant for several years but in recent years the capacity growth rate has changed. Capacity growth is currently more than 30 % per year. Forecasts for capacity growth are very positive. Production cost of photovoltaic decreases when capacity increases. Production cost is one of the important factor which interact the commercialization of photovoltaic.

Calculation of the future photovoltaic production cost are gone through in this work. Technology learning coefficient influences the development of photovoltaic power production cost. Photovoltaic power production costs are compared with coal-fired power plant production costs. The point of time when these production costs meet can be considered to be the time of market penetration of solar power. To calculate that is the purpose of this work. The result is a coarse estimate for the market penetration but it gives an idea the future development of photovoltaic.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Tampereen teknillisen yliopiston sähkövoimatekniikan laitokselle apurahalla. Varsinaista tilaajaa ei työlle ollut, mutta aihe oli kiinnostava ja siten siitä tehtiin diplomityö.

Työn tarkastajana ja ohjaajana on toiminut professori Seppo Valkealahti. Suuret kiitokset hänelle hyvistä neuvoista sekä kärsivällisyydestä.

Haluan kiittää myös vanhempiani kannustuksesta sekä työhöni osoittamasta mielenkiinnosta. Heidän kannustuksensa oli yksi merkittävä tekijä tämän työn teossa.

Tampereella 12.05.2011

Maria Puhtila

Ruovedenkatu 13 B 27

33720 Tampere

Puh. 050 4663662

SISÄLLYS

LYHENTEET JA MERKINNÄT	vii
1. JOHDANTO	1
2. ENERGIALÄHTEIDEN KÄYTÖN KEHITYS	3
2.1. Primääriset energialähteet	3
2.1.1. Uusiutumattomat energialähteet	5
2.1.2. Uusiutuvat energialähteet	6
2.2. Sähköenergian kulutus ja tuotanto	8
3. UUSIUTUMATTOMIEN JA UUSIUTUVIEN ENERGIALÄHTEIDEN	10
RIITTÄVYYS JA HINTAKEHITYS	10
3.1. Uusiutumattomat energialähteet	11
3.1.1. Käyttö	11
3.1.2. Riittävyys	12
3.1.3. Hintakehitys	13
3.2. Uusiutuvat energialähteet	15
3.2.1. Käyttö ja kapasiteetti	15
3.2.2. Hintakehitys	18
4. AURINKOSÄHKÖ	20
4.1. Käyttö ja kapasiteetti	20
4.1.1. Aurinkosähkö Euroopassa	23
4.2. Tuotantokustannukset	24
4.2.1. Aurinkokennot	25
5. TEKNOLOGISEN KEHITTÄMISEN ENNUSTAMINEN	28
5.1. Teknologisen kehityksen ennustamismenetelmistä	28
5.1.1. Teknologian kehittyminen	29
5.2. Teknologinen diffuusio	30
5.2.1. Diffuusiosta yleensä	31
5.2.2. Diffuusion mallintaminen	32
5.3. Teknologian kustannusten kehittyminen	33
5.3.1. Oppimiskäyrän yleinen malli	33
5.3.2. Aurinkosähkön oppimiskäyrästä	35
6. AURINKOVOIMALOIDEN KAUPALLISTUMISEN ENNUSTAMINEN	38

6.1. Ennustuksessa käytetty malli	38
6.2. Hiililauhteen lähtötiedot	39
6.3. Aurinkosähkön lähtötiedot.....	41
6.4. Aurinkosähkön kilpailukyvyn määrittäminen	42
6.4.1. Perusanalyysi.....	43
6.4.2. Lisäanalyysi.....	48
6.4.3. Johtopäätökset	50
7. YHTEENVETO	52
LÄHTEET	54
LIITE 1: Energiayksiköiden väliset muuntokertoimet.....	58
LIITE 2: Annuiteettitekijä	59

LYHENTEET JA MERKINNÄT

α	Käyrän suhteellisen sijainnin määrittävä kerroin, kun $t=0$
β	Diffuusion nopeutta kuvaava kerroin
ε	Virhetermi
η	Hyötysuhde
a	annuiteettitekijä
b	Oppimiskerroin
C	Tuotantokustannus
C_1	Investointikustannus
C_{kk}	Käyttä- ja kunnossapitokustannus
$C(t)$	Tuotantokustannukset ajan hetkellä t
H_p	Polttoaineen hinta
LR	Kustannusten pienentymistä kuvaava suhdelukuku (Eng. Learning Rate)
$N(t)$	Muuttujan kumulatiivinen suuruus ajan hetkellä t
m	Muuttujan maksimiarvo
PR	Kustannusten kehittymistä kuvaava suhdeluku (Engl. Progress ratio)
$q(t)$	Kumulatiivinen tuotantomäärä ajan hetkellä t
t	Aika
t_h	Huipunkäyttöaika
a-Si	Amorfinen pii
CIS	Kupari-indium-diseleeni
CIGS	Kupari-indium-gallium-diseleeni
CdTe	Kadmium-telluridi
CO_2	Hiilidioksidi
mc-Si	Monikiteinen pii
sc-Si	Yksikiteinen pii
BOS	Järjestelmätase (Engl. Balance of Systems)
CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (Engl. Combined Heat and Power)
CSP	Keskittävä aurinkovoima (Engl. Concentrated solar power)
EIA	Energiatietovirasto (Engl. Energy Information Administration)
EPIA	Euroopan aurinkosähköteollisuuden järjestö (Engl. European Photovoltaic Industry Association)
EREC	Euroopan uusiutuvan energian järjestö (Engl. European Renewable Energy Council)

EU	Euroopan Unioni (Engl. European Union)
IEA	Kansainvälinen energiavirasto (Engl. International Energy Agency)
OECD	Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö (Engl. Organisation for Economic Co-operation and Development)
OPEC	Öljynviejäm maiden yhteistyöorganisaatio (Engl. Organization of the Petroleum Exporting Countries)
PV	Fotosähköinen (Engl. Photovoltaics)
PVC	Polyvinyylikloridi (Engl. polyvinyl chloride)
USGS	Yhdysvaltojen geologinen tutkimuslaitos (Engl. U.S. Geological Survey)
U.S.	Amerikka (Engl. United States)
YK	Yhdistyneet Kansakunnat (Engl. United Nations)

1. JOHDANTO

Aurinko on ihmiskunnan tärkein energian lähde. Auringon säteily ylläpitää elämää maapallolla ja antaa eliöille niiden tarvitseman energian. Itse asiassa lähes kaikki maapallolla esiintyvä energia, lukuun ottamatta ydin-, vuorovesi- ja geotermistä energiaa, on käytännössä peräisin auringosta. Maapallolla ei olisi elämää ilman aurinkoa ja sen tuottamaa säteilyä. Yhdessä tunnissa maapallolle tulee enemmän energiaa kuin ihmis-kunta käyttää vuodessa.

Auringon lämpöenergiaa on osattu hyödyntää aina, mutta aurinkosähkön historia alkaa vasta vuodesta 1877. Tällöin havaittiin fotosähköinen ilmiö ensimmäisen kerran kiinteässä materiaalissa, seleenissä. Vuonna 1893 Becquerel havaitsi, että elektrolyyttiin upotettujen elektrodien välinen jännite riippui valon määrästä. [God04] Havaittua auringon säteilyn muuttumista sähköksi alettiin ymmärtää vasta 1900-luvun puolella kvanttimekaanisen teorian kehityksen myötä. Puolijohdetekniikan kehittyminen mahdollisti ensimmäisen piistä valmistetun aurinkokennon keksimisen vuonna 1954. Tämä oli ensimmäinen fotosähköinen laite, joka muunsi auringon valoa sähköksi suhteellisen hyvällä 6 % hyötysuhteella. [Ele]

Vuosikymmenten aikana aurinkosähkösovellukset ovat muuttuneet hyvin paljon. Aluksi niitä käytettiin vain avaruustekniikan voimanlähteinä, mutta nykyään ne ovat arkipäivää kuluttajille. Aurinkokennojen hintojen lasku on mahdollistanut niiden yksityiskäytön niin kesämökeillä kuin muissakin sähköverkon ulottumattomissa olevissa paikoissa. Myös kehittyvissä maissa, joissa infrastruktuuri on heikko, hyödynnetään aurinkosähköä paljon.

2000-luvun puolella on alettu kiinnittää erityistä huomiota energiantuotannossa ympäristövaikutuksiin. Taustalla on fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ja niiden yhteys maapallolla havaittuun ilmaston lämpenemiseen. Aurinkosähkön tuotannon ympäristökuormitukset rajoittuvat lähinnä kennojen valmistukseen ja käytöstä poistoon. Aurinkosähkö on yksi puhtaimmista tavoista tuottaa sähköenergiaa. Myös fossiilisten polttoaineiden rajallinen määrä ja huoli niiden loppumisesta ovat kannustaneet ihmiskuntaa tutkimaan uusiutuvia energialähteitä. Aurinkoenergia on tässäkin suhteessa ylivoimainen muihin energialähteisiin verrattuna sillä sitä on käytännössä tarjolla rajaton määrä.

Ympäristönäkökulmien korostuminen, aurinkosähkön hinnan lasku ja yleinen energian hinnan nousu ovat johtaneet siihen, että aurinkosähköstä on muodostunut potentiaalinen vaihtoehto fossiilisille polttoaineille. Tekniikkaa on alettu viime vuosina tutkia entistä enemmän ja siihen on panostettu lukemattomia työtunteja ja suuria summia rahaa.

Tämän työn tavoitteena on selvittää vuosikymmen, jolloin aurinkosähkö on kilpailukykyinen hiililauhdeella tuotetun sähkön kanssa. Hiililauhde on valittu vertailukohtaksi, koska tällä hetkellä sen avulla tuotetaan maapallolla eniten sähköä. Aurinkosähköllä tarkoitetaan tässä työssä fotosähköiseen ilmiöön perustuvaa sähköntuotantoa. Nykyään

tuotetaan sähköä myös auringon lämpöenergian avulla. Myös tämä tuotantomuoto laskeaan auringon avulla tuotetuksi sähköksi, mutta sitä ei käsitellä tässä työssä lainkaan.

Johdannon jälkeen työssä perehdytään ensin työn lähtökohtiin. Selvitetään mitä ovat primääriset energialähteet ja kuinka ne jakautuvat uusiutuviin ja uusiutumattomiin energialähteisiin. Samassa luvussa käydään läpi myös nykyinen sähköenergian tuotanto ja kulutus. Tästä siirrytään fossiilisiin polttoaineisiin, niiden riittävyyteen ja hintakehitykseen. Fossiiliset polttoaineet ovat rajattu kolmeen tärkeimpään: hiileen, öljyyn ja maakaasuun. Fossiilisista polttoaineista siirrytään uusiutuviin energialähteisiin. Uusiutuvia energialähteitä käsitellään lyhyesti samassa luvussa. Läpi käydään kolme tärkeintä uusiutuvaa energialähdettä: tuulivoima, vesivoima ja bioenergia. Aurinkosähköstä on tehty oma lukunsa. Neljäs luku käsittelee aurinkosähkön kapasiteetin kehitystä sekä tuotantokustannuksia.

Työssä tutkitaan myös yleisesti teknologisen kehittymisen lainalaisuuksia ja malleja, kuten eri ennustamismenetelmiä. Mielenkiintoisin niistä on oppimiskäyrä, jota sovelletaan myös työn varsinaisessa tulosluvussa. Viimeisessä luvussa ennen yhteenvetoa tutkitaan Excel-sovelluksen avulla aurinkosähkön kilpailukykyä hiililauhteen suhteen. Tarkoituksena on parametrien avulla saada tulokseksi ajan kohta, jolloin aurinkokennoilla tuotetun sähkön hinta ja hiililauhteella tuotetun sähkön hinta kohtaavat. Viimeiseksi yhteenvedossa esitellään työn keskeiset tulokset ja niistä tehdyt johtopäätökset.

2. ENERGIALÄHTEIDEN KÄYTÖN KEHITYS

Maailman energian käyttö on lisääntynyt huomattavasti viime vuosikymmeninä, eikä sen tasaantumista ole näkyvissä. Yhteiskuntamme toimivuus riippuu pitkälti esteettömästä energian saannista. Valtaosa käytetystä energiasta tuotetaan vielä nykyisin uusiutumattomilla energialähteillä, mutta tähän on ennustettu tulevan muutos ajan kuluessa. Uusiutumattomien energialähteiden niukkeneminen ja niiden hinnan nousu tulevina vuosina vaikuttavat osaltaan energiasektorin toimintaympäristön muutokseen. Uusiutuvista energialähteistä tulee houkuttelevampia ja niiden käyttö alkaa taloudellisestikin olla järkevää. Muutoksia on jo tapahtunut toimintaympäristössä ja tulevina vuosikymmeninä muutosten vauhti vain kiihtyy. Ilmastomuutos ja siihen liittyvät ilmastopäätökset antavat osaltaan vauhtia meneillä oleviin muutoksiin.

Tämän luvun tarkoituksena on antaa lukijalle kokonaiskuva maailman energialähteistä ja niiden kulutuksesta. Luvussa käsitellään primääriset energialähteet lyhyesti ja jaotellaan ne uusiutumattomiin ja uusiutuviin energialähteisiin. Sähköenergian osuus maailman energiankulutuksesta on kasvanut huomattavasti viime vuosikymmeninä ja sen kasvuvauhdin on ennustettu vain kiihtyvät. Tämän vuoksi luvussa käsitellään lyhyesti myös maailman sähköenergian nykyistä kulutusta ja tuotantoa. Viimeiseksi luvussa käydään läpi tärkeimmät toimintaympäristön muutokseen liittyvät seikat.

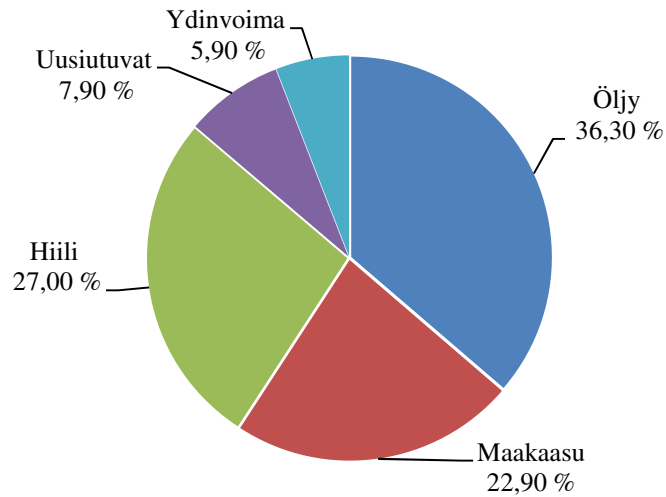
Energia-alalla on käytössä lukematon määrä erilaisia yksiköitä ja mittajärjestelmiä riippuen toimijan maantieteellisestä sijainnista. Tähän työhön ne on muutettu wattitunneiksi, mutta tarvittaessa Liitteestä 1 löytyvät tärkeimmät yksiköt ja niiden muunnoskerroimet.

2.1. Primääriset energialähteet

Lähes kaikki maapallolla esiintyvät energialähteet ovat peräisin auringosta. Poikkeuksen muodostavat uraani ja geoterminen energia, jotka ovat peräisin maapallon synnyn ajalta. Kolmannen poikkeuksen tekee kuun vetovoimasta aiheutuva vuorovesienergia. Tosin tähänkin ilmiöön auringolla on osuutensa. Fossiiliset energialähteet sekä uusiutuvat energialähteet ovat suorassa syy-seuraus-suhteessa aurinkoon. Niihin on varastoitunut auringon energiaa aikojen saatossa. Fossiiliset energialähteet ovatkin esimerkki auringon energian pitkäaikaisesta varastoitumisesta kun taas uusiutuvat energialähteet ovat esimerkki auringon energian lyhytaikaisesta varastoitumisesta.

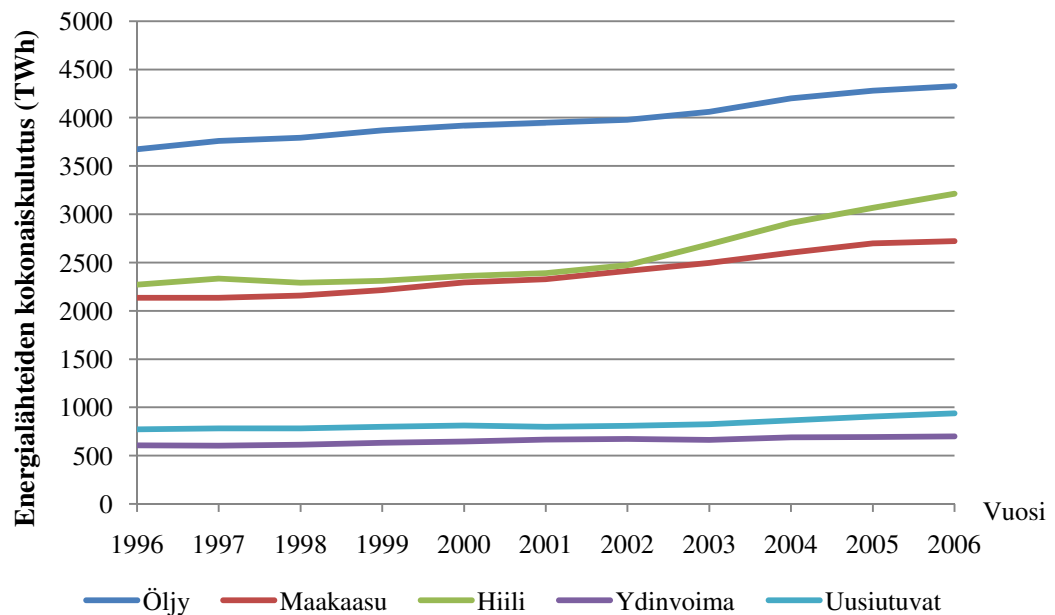
Primäärinen energia on suoraan luonnon tarjoamaa energiaa. Sitä ei ole vielä jalostettu käyttökelpoiseen muotoon. Primäärisillä energialähteillä voidaan tarkoittaa niin hiiltä, öljyä ja maakaasua kuin myös vesivoimaa, auringon säteilyä ja polttopuuta. Primääriset energialähteet jaotellaan yleensä niiden uusiutumiskyvyn mukaan joko uusiutuviin tai uusiutumattomiin lähteisiin. Primäärisestä energiasta saadaan jalostamalla sekundääristä energiaa, jota voidaan hyödyntää erilaisissa tuotantoprosesseissa. Sekundäärillä energialla tarkoitetaan esimerkiksi sähköenergiaa. Maailman primäärisen energian kokonaiskulutus vuonna 2006 oli noin 138 400 terawattituntia (TWh). Vastaa-

vasti maailman primäärisen energian kokonaistuotanto vuonna 2006 oli noin 137 200 TWh. [EIA08a, EIA08b] Kokonaiskulutus oli siis kokonaistuotantoa suurempi. Kuvassa 2.1 on esitetty eri energialähteiden suhteelliset osuudet kokonaiskulutuksesta.



Kuva 2.1. Maailman primäärienergian kokonaiskulutus energialähteittäin jaoteltuna vuonna 2006. [EIA08b]

Kuvan 2.1. mukaan selvästi tärkeimmät primääriset energialähteet ovat öljy, maakaasu ja hiili. Kuvasta havaitaan myös se, että fossiiliset polttoaineet kattoivat vuonna 2006 yli 86 % primäärienergian kokonaiskulutuksesta. Kuvassa 2.2 on vielä esitetty eri primäärienergialähteiden kokonaiskulutuksen kehitys vuodesta 1996 vuoteen 2006.



Kuva 2.2. Maailman primäärienergialähteiden kokonaiskulutuksen kehitys vuodesta 1996 vuoteen 2006. [EIA08b]

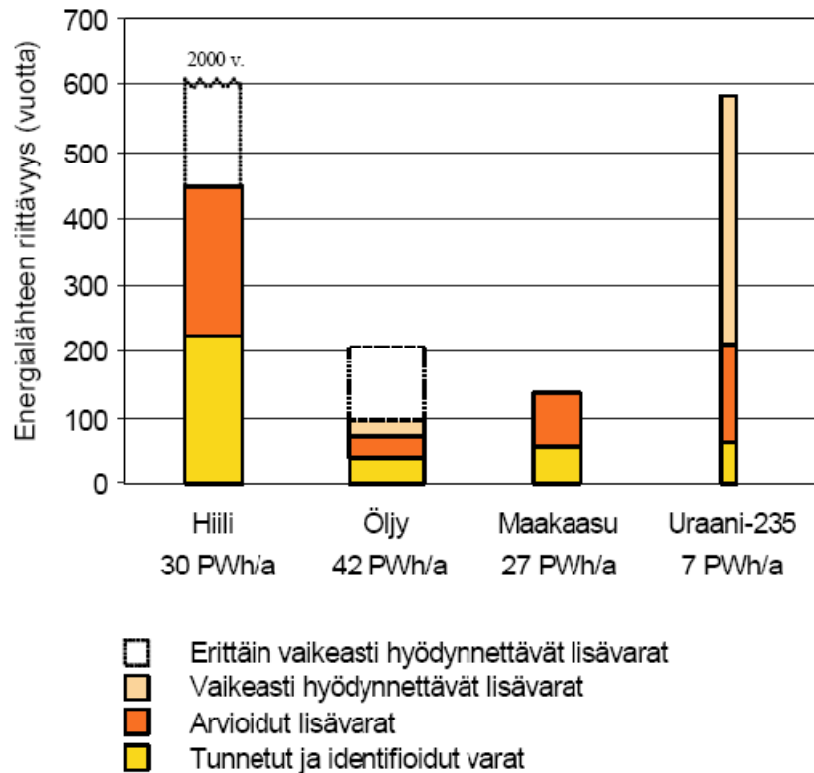
Kuten kuvasta 2.2. voidaan havaita, öljyn, maakaasun ja hiilen osuus kulutuksesta on ollut voimakkaasti nousussa koko 2000-luvun ajan. Ydinvoiman sekä uusiutuvien energialähteiden osuus on pitkään pysynyt lähes vakiona. Tätä havaintoa tukee myös Yhdysvaltojen energiaministeriön alainen energiatietovirasto EIA (Engl. Energy Information Administration), joka on ennustanut öljyn, hiilen ja maakaasun hallitsevan energian käyttöä vähintään seuraavat 25 vuotta. [EIA06]

2.1.1. Uusiutumattomat energialähteet

Uusiutumattomat energialähteet eivät nimensä mukaan uusiudu tai niiden uusiutumiseen menee satoja miljoonia vuosia. Fossiilisiin polttoaineisiin on varastoituneena auringon energiaa ja ne ovatkin pääsääntöisesti peräisin miljoonien vuosien aikana syntyneistä eläin- ja kasvijätteistä. Uraani lasketaan myös uusiutumattomaksi energialähteeksi. Se poikkeaa muista energialähteistä siten, että se on peräisin maapallon ja aurinkokuntamme synnyn ajalta eikä näin ollen uusiudu lainkaan. Uusiutumattomien energialähteiden käyttö pienentää siis maapallomme rajallisia energiavarantoja koko ajan. Maailmanlaajuisesti neljä tärkeintä uusiutumattomaa energialähdettä ovat öljy, hiili, maakaasu ja uraani. Vuonna 2006 nämä neljä energialähdettä kattoivat yli 92 % maapallon primäärienergian kokonaiskulutuksesta. [EIA08b]

Uusiutumattomat energiavarat jaotellaan tunnettuihin ja identifioituihin varoihin sekä arvioituihin lisävaroihin. Tunnettujen ja identifioitujen varojen sijainti on tiedossa ja niiden koon suhteen on olemassa mittauksiin perustuvia arvioita. Arvioitujen lisävarojen olemassaolo on päätelty tilastollisesti geologiseen tietämykseen perustuen, mutta ne tulee vielä löytää ennen mahdollista käyttöönottoa. Lisävaroja koskevat arviot ovat näin ollen hyvin epätarkkoja. [VTT04]

Kuvassa 2.3. esitetään tärkeimpien uusiutumattomien energialähteiden vuonna 2003 tunnetut ja arvioidut varat suhteutettuna sen hetkiseen kokonaiskulutukseen. Palkin leveys kuvaa kyseisen energialähteen vuosikäyttöä, joka on ilmoitettu kuvassa energialähteen nimen alapuolella. Palkin korkeus kuvastaa energialähteen riittävyyttä vuosissa. Kuvasta ilmenee myös energiavarojen jaottelut tunnettuihin varoihin ja arvioituihin lisävaroihin.



Kuva 2.3. Tunnettujen ja arvioitujen fossiilisten polttoainevarojen riittävyys vuoden 2003 kulutuksella. Hiili sisältää kivihiilen, ruskohiilen ja bitumihiilen varat. [Ber06]

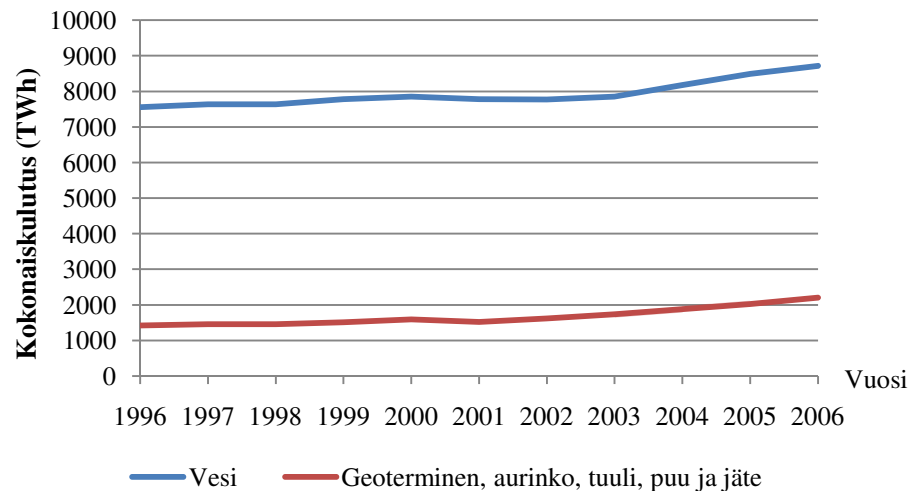
Kuvasta 2.3. voidaan havaita, että varojen ehtyminen on lähimpänä öljyllä. Seuraavaksi loppuneen maakaasu, jonka tunnetut ja identifioitavat varat eivät juurikaan ole öljyä suuremmat. Maakaasun käyttöä ollaan lisäämässä tulevaisuudessa, joten arviot sen riittävydestä tulevat muuttumaan. Hiiltä on maankuorella selvästi eniten ja sen riittävyys nykyisellä kulutuksella onkin taattu sadoiksi vuosiksi eteenpäin. Uraanin hyvä riittävyys ei niinkään perustu riittäviin varoihin vaan muuta vähäisempään vuosikulutukseen.

2.1.2. Uusiutuvat energialähteet

Maapallon uusiutuvat energialähteet muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta ovat suorassa syy-seuraus-suhteessa aurinkoon. Tällaisia uusiutuvia energialähteitä ovat muun muassa aurinkoenergia, tuulivoima, biomassa ja vesivoima. Yleisesti ajateltuna uusiutuvien energialähteiden käyttö ei kuluta maapallon rajallisia energiavaroja vaan käytetty energia on heti tai lyhyen ajanjakson päästä uudelleen käytettävissä samassa muodossa. Uusiutuvat energialähteet kattoivat vain noin 8 % maailman vuosittaisesta primäärienergian kulutuksesta vuonna 2006. [EIA08b]

Uusiutuvien energialähteiden riittävyyttä ei ole mielekasta määritellä vuosissa, sillä uusiutuvia energialähteitä ei pystytä kuluttamaan loppuun. Poikkeuksen tähän tekee auringon säteilyenergian varastot, kuten biomassa. Nämä varastot ovat liiallisella käytöllä mahdollista kuluttaa loppuun, minkä jälkeen niiden uusiutuminen on erittäin hidas-

ta tai jopa kyseenalaista. Tällaisille energialähteille määritelläänkin yleensä vuosittaisen kulutuksen yläraja, josta käytetään käsitettä vuosittain hyödynnettävissä oleva energia. Uusiutuvien energialähteiden hyödynnettävissä oleva energia voidaan jakaa edelleen teoreettiseen, taloudelliseen ja tekniseen potentiaaliin. [Ber06] Kuvassa 2.4. on esitetty uusiutuvien energialähteiden kokonaiskulutuksen kehittyminen vuodesta 1996 vuoteen 2006.



Kuva 2.4. Uusiutuvien primääristen energialähteiden kokonaiskulutuksen kehitys vuodesta 1996 vuoteen 2006. [EIA08b]

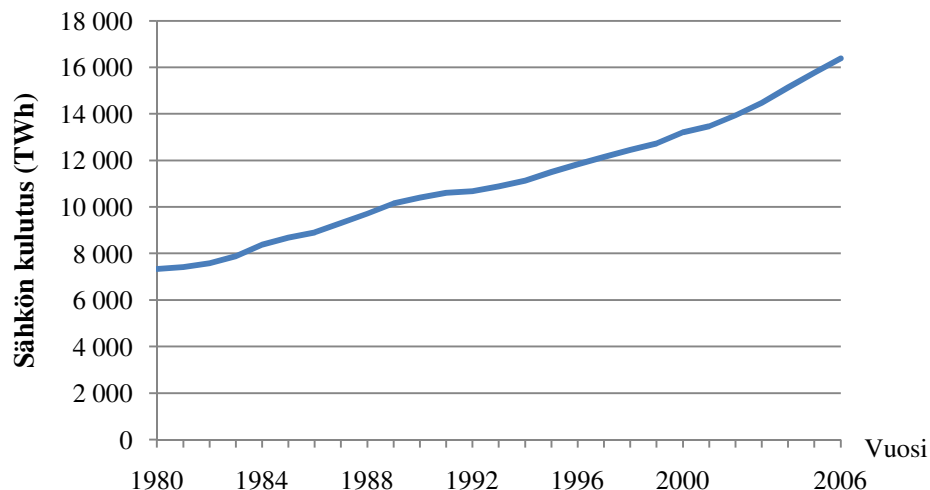
Kuvasta 2.4. voidaan havaita, että vesivoima on nykyisin eniten käytetty uusiutuva energialähde ja sen osuus on hyvässä noususuhdanteessa. Vuoden 2002 jälkeen on myös muiden uusiutuvien energialähteiden osuus ollut kasvussa. Tämän kasvun selittänevät tuulivoimaloiden lisääntyvät rakentamishankkeet.

Tuulivoima on ollut jo muutamia vuosia kasvavan kiinnostuksen kohteena. Tuulella on valtava energiapotentiaali ja tuulivoimaloita pyörittävä energia on ilmaista. Tuulivoiman osuus energiapaletista on nousussa ja vuoden 2008 lopussa asennettu tuulivoimakapasiteetti oli jo yli 121 000 MW. Tavoitteena onkin, että vuoden 2020 loppuun mennessä asennettua tuulivoimaa olisi maailmanlaajuisesti olemassa 1 500 000 MW. Yhdysvallat ja Kiina ovat tällä hetkellä johtavia maita tuulivoimamarkkinoilla. Niiden yhteinen osuus vuoden 2008 uudesta asennetusta tuulivoimakapasiteetista oli yli 55 %. [WWEA09]

Aurinkokennovoima on hyvin mielenkiintoinen lisä uusiutuviin energialähteisiin. Sen kapasiteetti on teoriassa rajaton, sillä yhdessä tunnissa tulee maapallolle yhtä paljon energiaa mitä ihmiskunta käyttää nykyisin vuodessa. Aurinkokennovoiman osuus energiankulutuksesta on vielä nykyisin suhteellisen pieni, mutta sen kasvuvauhti on viime vuosina ollut nopeaa. Vuoden 2008 lopulla asennettu aurinkosähkökapasiteetti oli yli 14 000 MW. Euroopan alueella on eniten tällä hetkellä asennettua aurinkosähköä. Euroopan osuus on yli 65 % maailmanlaajuisesta asennetusta aurinkosähkön tuotantokapasiteetista. [EPIA09]

2.2. Sähköenergian kulutus ja tuotanto

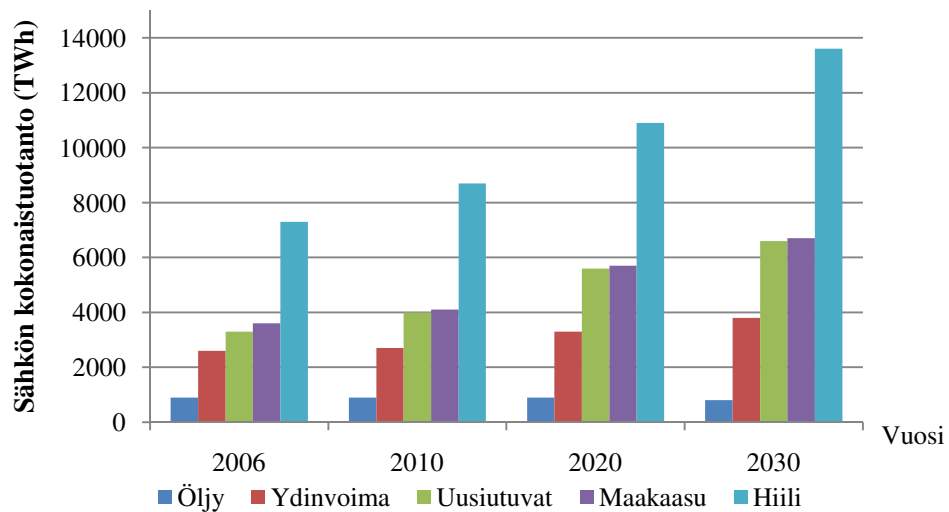
Maailmanlaajuisesti sähköenergian kulutus oli noin 12 % maailman primäärienergian kulutuksesta vuonna 2006. Sähköenergian suhteellinen osuus loppukulutuksesta on kasvanut viimeisten vuosikymmenien aikana tasaisesti. Sähkön absoluuttinen kulutus on myös kasvanut tasaisesti maailmassa, kuten kuvasta 2.5. voidaan todeta. [EIA08a, EIA08c]



Kuva 2.5. Maailman sähköenergian kulutus aikavälillä 1980–2006. [EIA08c]

Kuvasta 2.5. voidaan havaita, että maailman sähköenergian kulutus on yli kaksinkertaistunut noin 20 vuodessa. Käyrästä voidaan myös huomata, että siinä ei näy tasaantumista vaan se jatkaa kasvua. EIA onkin ennustanut, että maailman sähkön kulutus jatkaa kasvuaan vuoteen 2030 asti noin 2,4 % vuodessa, saavuttaen vuonna 2030 yli 30 000 TWh:n rajan. Tämä luo haasteita sähköenergian tuotannolle tulevaisuudessa. [EIA09]

Yli 80 % sähköenergiasta tuotetaan vielä toistaiseksi uusiutumattomilla energialähteillä. Yksistään hiilellä tuotetaan yli 40 % käytetystä sähköenergiasta. Uusiutuvien energialähteiden osuus maailman sähköenergian tuotannosta on vielä kohtuullisen pieni, alle 20 %. Tästä osuudesta suurin osa on tuotettu vesivoimalla, muiden uusiutuvien energialähteiden osuus tuotannosta on toistaiseksi vielä häviävän pieni. Tilanteen ei uskota muuttuvan ainakaan 25 vuoteen, joka voidaan todeta myös kuvasta 2.6. Kuvassa on esitetty vuoden 2006 sähköenergian tuotanto energialähteittäin sekä ennusteet vuosille 2010, 2020 ja 2030. [EIA09]



Kuva 2.6. Maailman sähköenergian kokonaistuotanto jaoteltuna energialähteittäin vuonna 2006 sekä ennusteet vuosille 2010, 2020 ja 2030. [EIA09]

Kuvasta 2.6. voidaan todeta sama, mikä tuli edellisessä kappaleessa jo ilmi: hiilen käyttö sähköenergian tuotannossa tulee kasvamaan ainakin vuoteen 2030 asti. Öljyn ja maakaasun hintojen kohoamisen myötä hiilen käyttö sähköenergian tuotannossa houkuttaa entistä enemmän, etenkin maita joilla hiilivarannot ovat suuret. Tämä osaltaan vaikuttaa hiilen käytön lisääntymiseen. Nämä ennusteet ovat tosin vain arvioita, eikä tiedetä tarkasti, miten fossiilisten polttoaineiden hinta kehittyy ja kuinka suuri osuus tulee olemaan erilaisilla ilmastopimuksilla sekä päästökaupalla fossiilisten polttoaineiden kustannuksissa. Edellä mainituista syistä johtuen ydinvoiman osuus voi kasvaa nopeammin kuin ennusteessa on esitetty.

Uusiutuvat energialähteet ovat EIA:n mukaan kuitenkin nopeimmin kasvava sähköenergian tuotantomuoto nykyisin. Uusiutuvien energialähteiden käyttö sähköenergian tuotannossa kasvaa lähes 3 %:n vuosivauhtia, saavuttaen vuonna 2030 noin 21 % osuuden maailman sähköenergian kokonaistuotannosta. Eniten tulevat lisääntymään vesivoiman ja tuulienergian osuudet. Esimerkiksi tuulienergian avulla tuotetun sähköenergian määrä tulee kasvamaan 10 %:n vuosivauhtia vuoteen 2030 asti. [EIA09]

3. UUSIUTUMATTOMIEN JA UUSIUTUVIEN ENERGIALÄHTEIDEN RIITTÄVYYS JA HINTA- KEHITYS

Maailman primäärienergian kulutus perustuu nykyisin suurelta osin uusiutumattomiin energialähteisiin. Näiden riittävyys ja hintakehitys vaikuttavat suuresti maailman talouteen ja energian kulutukseen. Kasvava energian kulutus ja uusiutumattomien energialähteiden kutistuvat varat vaikuttavat omalta osaltaan energiasektorin toimintaympäristöön ja uusiutuvien energialähteiden kasvavaan hyödyntämiseen.

Uusiutumattomista energialähteistä tärkeimmät ovat hiili, öljy ja maakaasu. Nämä kolme energialähdettä muodostavat yhdessä yli 85 % osuuden primäärienergianlähteiden käytöstä. Näiden kolmen lähteen käytössä, riittävyydessä ja kysynnässä tapahtuvat muutokset heijastuvat talouden eri osa-alueisiin hyvin voimakkaasti, esimerkiksi öljyn hinnan muutokset vaikuttavat tavallisten ihmisten jokapäiväiseen elämään elintarvikkeiden kallistumisen myötä.

Uusiutumattomien energialähteiden niukkuus ja hinnan nousu ovat luoneet paineita kehittää uusia energialähteitä ihmiskunnalle. Osa uusiutuvista energialähteistä on ollut käytössä jo kauan ja niiden hyvät ominaisuudet ovat tuttuja jo satojen vuosien takaa. Tällaisia uusiutuvia energialähteitä ovat esimerkiksi vesi ja polttopuu. Aivan uusiakin energialähteitä on kehitelty, mutta niiden käyttö on vielä melko marginaalista. Varmaa on kuitenkin se, että uusiutuvien energialähteiden osuus tulee kasvamaan huomattavasti tulevaisuudessa, niin poliittisista kuin käytännöllisistäkin syistä.

Uusiutuvien energialähteiden käyttö on lisääntynyt 2000-luvulla huomattavasti ja ennusteet niiden käytöstä ovat erittäin positiivisia. Ennusteiden lähtötaso on kieltämättä matala, mutta asia korjaantunee tulevina vuosina. Uusiutuvien energialähteiden kapasiteeteissa on vaihtelua melkoisesti. Vesivoiman kapasiteettia ei voida enää kovin paljoa lisätä kun taas esimerkiksi aurinkosähkön kapasiteetti teoriassa riittäisi kattamaan maailman kasvavan energiantarpeen ikuisesti. Uusiutuvien energialähteiden ongelmana tosin on se, että niiden käyttöä rajaa esimerkiksi käytettävän energian jakautuminen laajalle pinta-alalle tai tehotiheyden vaihtelu ajan ja paikan mukaan.

Luvun alussa käydään läpi uusiutumattomien energialähteiden käyttö nykyään ja esitellään myös näiden käyttömäärien kehitys nojautuen EIA:n ennusteisiin. Sitten tarkastellaan uusiutumattomien energialähteiden riittävyyttä nyt ja tulevaisuudessa sekä niiden ennustettua hintakehitystä. Lopuksi käsitellään uusiutuvista energialähteistä tuulivoiman, vesivoiman ja bioenergian käyttöä, kapasiteettia sekä niiden yleistä hintakehitystä. Marginaaliset ryhmät, kuten esimerkiksi geoterminen energia ja aaltovoima jätetään käsittelemättä niiden pienuuden vuoksi. Uraani jätetään myös käsittelemättä tässä yhteydessä. Uraanin hintakehitys ei ole merkittävä tekijä, koska ydinvoimalla tuotetun sähkön tuotantokustannuksissa polttoaineella on häviävän pieni merkitys.

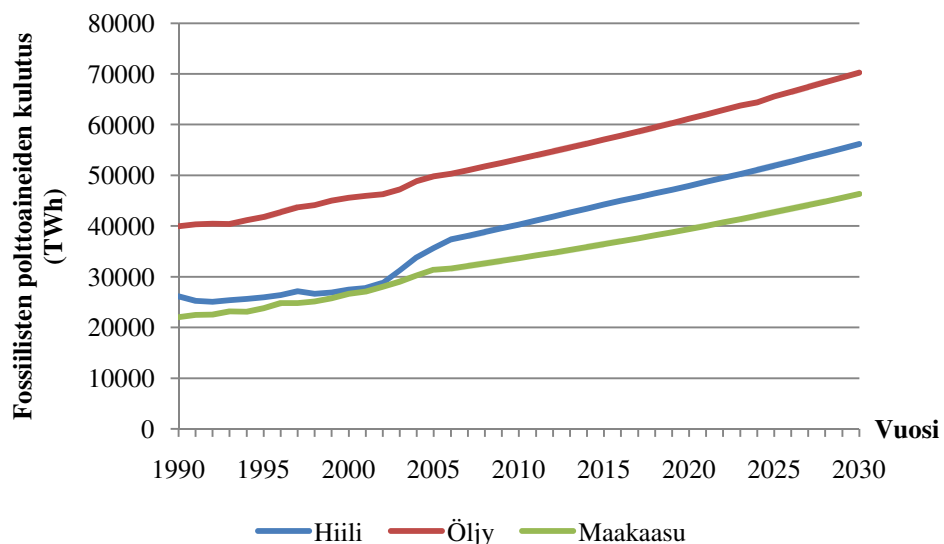
3.1. Uusiutumattomat energialähteet

3.1.1. Käyttö

Maailman primäärienergian kokonaiskulutuksesta yli 80 % katettiin uusiutumattomilla energialähteillä vuonna 2006. Kolme suurinta energialähdettä tuolloin olivat hiili, öljy ja maakaasu. Hiilen osuus primäärienergian kokonaiskäytöstä oli noin 27 % vastaten noin 37 000 TWh:a. EIA on ennustanut hiilen kokonaiskulutuksen lisääntyvän noin 1,9 %:n vuosivauhtia, nousten vuonna 2030 yli 55 000 TWh:iin. Tämä nousu selittyy lähinnä Aasian maiden kasvavana kulutuksena. Länsimaissa kulutuksen kasvu on maltillisempaa.[EIA08b, EIA09]

Öljyn osuus primäärienergian kokonaiskulutuksesta oli vuonna 2006 noin 36 % vastaten noin 50 000 TWh:a. EIA on ennustanut öljyn kulutuksen kasvavan vuosittain noin 1,4 % vuoteen 2030 asti. Liikennesektorin jatkuva kasvu selittää kasvavan öljyn kulutuksen tulevaisuudessa. Etenkin Aasian alueen voimakkaasti teollistuvissa maissa öljyn kulutus on ollut jatkuvasti nousussa. [EIA08b, Nev06]

Maakaasun osuus primäärienergian kokonaiskulutuksesta vuonna 2006 oli noin 23 % vastaten noin 31 000 TWh:a. EIA on ennustanut, että OECD-maissa maakaasun kulutus kasvaa noin 0,9 % vuodessa ja tähän ryhmään kuulumattomissa maissa 2,2 % vuodessa vuoteen 2030 asti. Maakaasun käytön on ennustettu lisääntyvän etenkin sähkön tuotannossa. Vuonna 2006 maakaasulla tuotetun sähköenergian osuus oli 32 % ja osuuden on ennustettu kasvavan 35 %:iin vuoteen 2030 mennessä. [EIA08b] Kuvassa 3.1. on esitetty näiden kolmen energialähteen kokonaiskulutuksen kasvuennuste vuoteen 2030 asti. Kuvan ennusteet on laskettu toteutuneen kulutuksen pohjalta nojautuen EIA:n ennusteisiin.



Kuva 3.1. Uusiutumattomien energialähteiden kokonaiskulutuksen kasvu vuodesta 1990 vuoteen 2030. Vuodesta 2007 kuvan arvot ovat ennusteita. [EIA08b]

Kuvasta 3.1. voidaan todeta, että niin hiilen, öljyn kuin maakaasunkin kulutuksen ennustetaan jatkavan tasaista kasvua vuoteen 2030 asti. Jokaisen energialähteen käyttö lisääntyy lähes puolella nykyisestä. Hiilen kokonaiskulutuksen kasvua selittää se, että maailman sähköntuotannon kannalta hiili on selvästi tärkein polttoaine. Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestön maissa eli OECD-maissa (engl. Organisation for Economic Co-operation and Development) hiilen kulutus on ennusteen mukaan kuitenkin huomattavasti maltillisempaa kuin tähän ryhmään kuulumattomissa maissa. [EIA09]

Kuvassa 3.1. näkyvä öljyn käytön kasvuennuste tulee Aasian nopeasti teollistuvissa maissa olemaan tätä ennustetta nopeampaa. Ylemmät arviot öljyn kokonaiskulutuksen kasvusta ovat 5 % vuodessa ja alemmat noin 3 % vuodessa. [VTT04] Maakaasun käytön lisääntyminen selittyy puolestaan öljyn hinnan nousulla ja sillä, että maakaasun käytöstä ei aiheudu yhtä paljon hiilidioksidipäästöjä kuin muiden fossiilisten polttoainesten käytöstä. Hiilen, öljyn sekä maakaasun kulutusta tulevaisuudessa tulleet kuitenkin hillitsemään maailmanlaajuiset ympäristösopimukset sekä etenkin öljyn tapauksessa sen nopeasti nouseva hinta. [EIA09]

3.1.2. Riittävyys

Maapallon kivihiilivarat ovat runsaammat ja tasaisemmin jakautuneemmat maapallolla kuin öljyn ja maakaasun varat. Suurimmat tunnetut hiilivarat sijaitsevat Yhdysvalloissa, Venäjällä ja Kiinassa. Nämä yksistään muodostavat yli 60 % maapallon tunnetuista hiilivaroista. Hiilen tunnetut kokonaisvarat vuonna 2006 olivat yli 900 miljardia tonnia, joka vastaa energiamäärältään yli 6 600 000 TWh:a. Vuoden 2006 kulutuksella tämä riittäisi noin 155 vuodeksi. [EIA09]

Energian tuotannon kannalta hiili ei ole yhtä kriittinen energialähde kuin öljy tai maakaasu, sillä sen riittävyys nykykulutuksella on huomattavasti suurempi kuin öljyllä tai maakaasulla. Hiilen vaikeampikäyttöiset varat ovat lisäksi huomattavat. Hyvälaatuisten hiilivarojen riittävyyden vuoksi ei huonompilaatuisten varojen käyttömahdollisuuksia ole tutkittu paljoa. Tunnettujen hiilivarojen on arvioitu olevan vain noin 10 % kokonaisvaroista. Hiiltä ei ole etsitty aktiivisesti viime vuosina, joten isoja esiintymiä on todennäköisesti vielä löytymättä. Hiilen loppuminen ei tästä syystä muodostu ongelmaksi tulevana vuosikymmeninä. [Nev06]

Arviot öljyvarojen suuruudesta vaihtelevat paljon. Varojen arviointi on hankalaa, sillä uusien löytöjen määrä ja tuotantotekniikan kehittyminen vaikuttavat laskelmiin. Vuoden 2009 alussa maailman suurimmat öljyvarat sijaitsivat Saudi-Arabiassa, Kanadassa, Iranissa ja Irakissa muodostaen yhdessä yli 50 % maapallon tunnetuista öljyvaroista. Öljymarkkinoiden ongelmana on varojen epätasainen jakautuminen maapallolla, sillä yli 50 % tunnetuista öljyvaroista sijaitsee epävakaisissa Lähi-idän maissa. [EIA09]

Maailman tunnettujen öljyvarojen suuruus kasvoi tasaisesti 1950-luvulta 1990-luvulle asti. Sen jälkeen tunnettujen varojen suuruus on pysytellyt lähes muuttumattomana. Uusien esiintymien löytäminen sitä vastoin on vähentynyt tasaisesti 1960-luvun puolivälistä lähtien. Samaan aikaan öljyn kulutus on kasvanut huomattavasti eikä öljyn kulutuksen kasvulle näy loppua. Yhdysvaltojen geologinen tutkimuslaitos USGS (Engl.

U.S. Geological Survey) on ennustanut, että tunnetut öljyvarat kasvavat noin 2 000 miljardiin barreliin vuoteen 2025 mennessä. Kasvun perusteena on öljyn tuotantotekniikan kehittyminen sekä jo löydettyjen esiintymien tehokkaampi hyödyntäminen. Arvio on epätarkka, sillä siihen vaikuttaa se, kuinka hyvin tulevaisuudessa pystytään vaikeissa paikoissa sijaitsevista esiintymistä öljyä hyödyntämään. Arvio ei myöskään huomioi hyödyntämiskustannuksia. Öljyn hintakehitys vaikuttaa luonnollisesti halukkuuteen hyödyntää tämänkaltaisia esiintymiä. [Nev06]

Yhdistettäessä öljyn kulutuksen kasvu ja rajalliset varat, tulevat öljyn saatavuus ja tuotantomahdollisuudet muutaman vuosikymmenen päästä rajoittamaan tarjontaa. Öljyn riittävyyttä tarkastellaan yleensä tunnettujen varojen ja vuotuisen tuotannon suhteen avulla. Nykykulutuksella tunnetut öljyvarat riittäisivät noin 40 vuodeksi. Todellisuudessa öljyä tulee riittämään pidempään, sillä öljyvarojen ehtymisestä seuraa öljyn korkea hinta, joka taas alkaa hillitä sen kulutusta ja toisaalta lisää ei-konventionaalisten öljyvarojen hyödyntämishalukkuutta. [Nev06]

Maakaasun suurimmat tunnetut varat sijaitsevat osittain samoilla alueilla kuin öljyn tunnetut varat. Suurimmat tunnetut maakaasuvarat sijaitsevat Venäjällä, Iranissa ja Qatarissa, jotka muodostavat yhdessä noin 57 % maailman tunnetuista varoista vuoden 2009 alussa. Maailman tunnettujen maakaasuvarojen suuruus vuoden 2005 lopussa oli noin 180 biljoona kuutiometriä, joka vastaa noin 1 880 000 TWh. Nykyisellä kulutuksella maakaasua riittäisi yli 60 vuodeksi. Maakaasun kulutus kasvanee tulevina vuosina esimerkiksi liikenteen polttoaineena. Tämä pienentää tunnettuja maakaasuvaroja nykyistä nopeammin. [EIA09]

USGS:n ennusteiden mukaan suuriakin maakaasuesiintymiä on vielä löytämättä, joten nykykulutuksella maakaasun riittävyys ei koidu ongelmaksi lähivuosikymmeninä. Ennusteiden mukaan löytämättömiä esiintymiä on noin 120 biljoonaa kuutiometriä, joka on noin kaksi kertaa suurempi määrä kuin ennustettu maakaasun kulutus aikavälillä 2002–2025. Maakaasun arvioiduista kokonaisvaroista kuitenkin 70 % sijaitsee paikoissa, jotka ovat kaukana maakaasuputkista ja kulutuksesta. Näiden varojen hyödyntäminen ei ainakaan vielä ole kannattavaa. [Nev06]

3.1.3. Hintakehitys

Hiilen hintakehitys on yleensä ollut rauhallisempaa kuin esimerkiksi öljyn hintakehitys. Hiilellä ei ole olemassa samankaltaista maailmanmarkkinahintaa kuin öljyllä vaan kyse on aina ollut paikallisista hinnoista riippuen muun muassa alueellisista hiilivaroista ja kuljetusetäisyyksistä. Hiilen yleisen hintakehityksen arvioiminen on tämän vuoksi hankalaa. [Nev06]

Kansainvälinen kauppa on hiilen kohdalla vielä pientä. Vuonna 2007 vain noin 16 % hiilen käytöstä perustui tuontiin. Hiilen hinnan odotetaan jatkossakin kehittyvän rauhallisesti. Hiilen hintaa nostavia tekijöitä ovat muun muassa nousevat tuotantokustannukset sekä rahtimaksut. Hintoja laskevia tekijöitä puolestaan ovat tuottavuuden parantuminen sekä uusien kaivosten avaaminen. Hiilen hinta on laskenut sitten öljykriisin, mutta hin-

nan odotetaan silti nousevan jatkossa kulutuksen kasvun myötä. Ilmastopöytäkirjalla voi olla hiilen hintaan hillitsevä vaikutus. [EIA09, Nev06]

Öljyn hinta vaikuttaa koko maailmantalouteen, sillä yhteiskunnassa ihmisten ja tavaroiden liikkuminen perustuu pitkälti öljyn eri jalosteiden hyödyntämiseen. Öljyn hinta riippuu useista eri tekijöistä, joka hankaloittaa öljyn hintakehityksen arviointia. Yksi tärkeä tekijä öljyn hinnan muodostumisessa on maailmanlaajuisen öljyntuotantokapasiteetin kasvu suhteessa öljyn kulutuksen kasvuun. Öljyn tuotannon ylittäessä vain niukasti kysynnän voivat tuotannossa tapahtuvat äkilliset muutokset heiluttaa öljyn hintaa merkittävästi. Öljyn tuotannon on ennustettu tulevaisuudessa ylittävän vain niukasti kysynnän, joten odotettavissa on isoja hintavaihteluita. Öljyn kasvavat kulutusennusteet ja niukkenevat öljyvarat aiheuttavat kuitenkin sen, että öljyn hintakehityksen suunta on ylöspäin. [Nev06]

Öljyn hinnan pitkän aikavälin ennusteet riippuvat pitkälti maailman talouskasvun- nusteista sekä energiantensiteetin kehittymisestä, jotka puolestaan vaikuttavat suoraan öljyn kulutukseen. Öljyn hinnan on ennustettu jatkossakin kehittyvän kysynnän ja tarjonnan mukaan. Yksi syy ennustettuun hintojen nousuun on uusien löydettyjen öljykenttien kokojen pientyminen ja niiden hyödyntämisen vaikeutuminen. Tämä nostaa öljyn tuotantokustannuksia ja sitä kautta öljyn markkinahintaa tulevaisuudessa. Kasvavat öljyn tuotantokustannukset eivät houkuttele investoimaan tuotantokapasiteettiin, joten öljyn tarjonta pysyttelee myös tulevaisuudessa niukkana suhteessa sen kysyntään. [Nev06]

EIA:n maaliskuussa 2009 ilmestyneessä julkaisussa vertailtiin edellä esitettyjä ennusteita kuuden eri instituution tekemien öljyn hinnan pitkän aikavälin ennusteiden kanssa. Kaikki ennusteet ovat vuoden 2007 valuutassa, joten ne ovat vertailukelpoisia keskenään. Hajonta eri ennusteissa oli todella suurta. Vertailun korkein referenssiennusteen mukainen arvio öljyn hinnalle vuodelle 2030 on 120 €/MWh ja matalin arvio samalle vuodelle on 63 €/MWh. Nämä toisistaan eroavat luvut osoittavat sen, kuinka hankalaa on ennustaa öljyn hinnan käyttäytymistä tulevaisuudessa. Kuten edellä on jo tullut ilmi, siihen vaikuttavat monet ennalta epävarmat asiat. Ilmeistä on vain se, että öljyn hinta voi tulevaisuudessa nousta hyvinkin paljon. [EIA09b]

Maakaasun hinta on viime aikoina noussut huomattavan paljon. Syynä tähän on öljyn hinnan nousu, sillä maakaasun hinta on sidottu vahvasti öljyn hintaan. Myös maakaasun voimakkaasti kasvanut kulutus on luonut paineita hinnan nostolle.

Maakaasulla on tilavuuteen verrattuna pieni energiatiheys, joten sen kuljettaminen on kallista. Tämä vaikeuttaa globaalien maakaasumarkkinoiden kehitystä. Maakaasun hinta on yleensä paikallinen, riippuen kuljetusetäisyyksistä ja käyttötarkoituksesta. Maakaasun hinnan kehittyminen on eri alueiden välillä kuitenkin samansuuntaista, koska maakaasun hinnan kehitys seuraa tiiviisti öljyn hinnan kehitystä, jolla taas on yksittäinen maailmanmarkkinahinta. Vain neljännes myydystä maakaasusta myydään kansainvälisille markkinoille, mutta osuuden uskotaan lisääntyvän tulevaisuudessa. Neljä suurinta maakaasumarkkina-aluetta ovat Pohjois-Amerikka, Eurooppa, Japani sekä Kaukoit. [Nev06]

Tulevaisuudessa EU:n alueen maakaasun hinnat todennäköisesti nousevat, sillä Euroopan oman tuotannon kääntyessä laskuun täytyy kasvava kysyntä tyydyttää Euroopan ulkopuolelta tuodulla maakaasulla. EU:n tuontiriippuvuuden ennustetaan nousevan 81 % vuoteen 2030 mennessä. Euroopan kasvavan maakaasun kulutuksen tyydyttäminen tuontikaasulla johtaa merkittäviin investointeihin siirtoyhteyksissä ja Euroopan ulkopuolella sijaitsevilla tuotantolaitoksissa. Investoinnit vaikuttavat nostavasti maakaasun hintaan. Toisaalta lyhyellä aikavälillä Euroopan vapautuvat maakaasumarkkinat saattavat lisätä kilpailua, joka saattaa laskea maakaasun kuluttajahintoja. [Nev06]

3.2. Uusiutuvat energialähteet

Uusiutuvista energialähteistä puhuttaessa käytetään niiden potentiaalista yleensä viittä eri määritelmää. Nämä potentiaalit jaotellaan teoreettiseen, muutos-, tekniseen, taloudelliseen sekä kestäväan potentiaaliin. Eri potentiaalien suuruudet voivat erota huomattavastikin toisistaan, sillä niiden laskentatavat poikkeavat suuresti toisistaan. Näitä ei ole mielekasta edes vertailla keskenään, vaan tulisi keskittyä toisen mielenkiinnon kohteena olevan energialähteen vastaaviin arvoihin. [EREC07a] On kuitenkin hyödyllistä tiedostaa virheiden välttämiseksi, että energialähteiden potentiaaleja voidaan laskea eri tavoin. Yksittäisen energialähteen kannalta tärkein potentiaali lienee taloudellinen potentiaali, jonka avulla voidaan arvioida lähteen hyöty kaupalliselta näkökannalta katsottuna.

Seuraavaksi käsitellään yleisimmät uusiutuvat energialähteet: tuulivoima, vesivoima ja bioenergia. Tekstissä esitetyt ennusteet ovat eräiden ympäristöjärjestöjen materiaaleista otettuja, joten niihin tulee suhtautua pienellä kriittisyydellä. Ne antavat kuitenkin hyvän kokonaiskuvan käsitellystä asiasta.

3.2.1. Käyttö ja kapasiteetti

Tuulivoima on tällä hetkellä yksi nopeimmin kasvavista energialähteistä maailmassa. Tuulivoimakapasiteetti on yli kaksinkertaistunut vuodesta 2005 vuoteen 2008. Vuonna 2008 tuulivoiman kokonaiskapasiteetti oli yli 121 GW ja kasvu oli noin 27 % edellisvuodesta. Tuulivoimalla tuotetun sähkön osuus on sähkön kokonaistuotannossa vielä pieni, sillä vuonna 2008 tuulivoimalla tuotettiin vain noin 260 TWh sähköä, mutta tulevaisuudessa sen osuus tulee kasvamaan. [WWEA09]

Tuulivoima jaotellaan yleensä On-shore- ja Off-shore-kapasiteetteihin. On-shore-kapasiteetilla tarkoitetaan maalla sijaitsevien tuulivoimaloiden yhteenlaskettua kapasiteettia, kun taas off-shore-kapasiteetilla tarkoitetaan merellä sijaitsevien tuulivoimaloiden yhteenlaskettua kapasiteettia. Maalla sijaitsevien tuulivoimaloiden kapasiteetti tulee kasvamaan huomattavasti nopeampaa tahtia kuin merellä sijaitsevien voimaloiden. Syyinä tähän on se, että tuulivoimalan rakentaminen maalle on tällä hetkellä yli puolet halvempaa kuin merelle. [EREC08a]

Tuuleen varastoitunut energia on kokonaisuudessaan moninkertainen verrattuna maailman sähköenergian kokonaistarpeeseen. Hyödyntämistä hankaloittaa energian jakaantuminen laajalle pinta-alalle sekä energialähteen epäsäännöllisyys ajan suhteen.

Pelkästään maalle rakennetun tuulivoiman vuotuinen tuotanto voisi periaatteessa olla noin 50 000 TWh. Tuulivoiman teknisestä potentiaalista esitetään paljon eri arvioita, sillä ne riippuvat täysin käytetystä tuulen keskinopeudesta sekä hyödynnettävästä maa-alasta. World Energy Council arvioi vuosittain hyödynnettäväksi tuulienergiaksi maa-alueilla noin 20 000 TWh. [BER06]

Vesivoima on uusiutuvista energialähteistä eniten käytetty tänä päivänä. Sen voidaan sanoa olevan jo kypsä teknologia, jota käytetään laajalti ympäri maapalloa sähkön tuotannossa. Sen osuus maailman sähköntuotannosta on noin 16 %. Vuonna 2008 maailmanlaajuisesti olemassa olevaa vesivoimakapasiteettia oli yli 950 GW. [REN09]

Vesivoiman kokonaiskapasiteetin on ennustettu kasvavan vielä vuosia, mutta sitä ei kuitenkaan voida tulevaisuudessa rajattomasti kasvattaa, sillä iso osa mahdollisista tuotantopaikoista alkaa olla jo käytössä, eikä kaikkia mahdollisia tuotantopaikkoja voida käyttää hyväksi ympäristönsuojelullisista syistä johtuen. Vesivoima jaetaan koon perusteella eri kokoluokkiin: suuriin yli 10 MW:n voimaloihin sekä pieniin alle 10 MW:n voimaloihin. Pienten vesivoimalaitosten kokoluokassa on myös mini- (0,5-2 MW), mikro- (0,02-0,5 MW) ja pikovesivoimalaitoksia (alle 20 kW). Kapasiteetiltaan suurimpia voimalaitoksia käytetään yleensä kaupallisissa tarkoituksissa. Vesivoiman kokonaiskapasiteetin lisäys tulevaisuudessa perustuu pienen kokoluokan (Engl. Small Hydro) voimaloiden määrän lisääntymiseen. Osa kokonaiskapasiteetin lisäyksestä perustuu myös vanhojen, jo käytössä olevien, voimaloiden tehon kasvattamiseen. Tämä onnistuu pääkoneistojen peruskorjauksen yhteydessä. [EREC08a, SBI09, MOT05]

Maapallon vesivoiman kokonaispotentiaaliksi on arvioitu noin 51 000 TWh vuodessa. Taloudellinen potentiaali on kokonaispotentiaalista vain noin 25 % eli noin 13 100 TWh, josta hyödynnettävissä olevaa potentiaalia on noin 10 500 TWh. Suurimmat hyödyntämättömät vesivoimavarat sijaitsevat Afrikassa, Etelä-Amerikassa, Kanadassa ja Venäjällä, mutta myös muualla maapallolla on vielä rakentamatonta vesivoimaa. Vesivoiman tuotantomäärät eivät kuitenkaan ole absoluuttisia, sillä ne voivat vaihdella suuressikin vuotuisen veden kierron mukaan. [Ber06, Väk05]

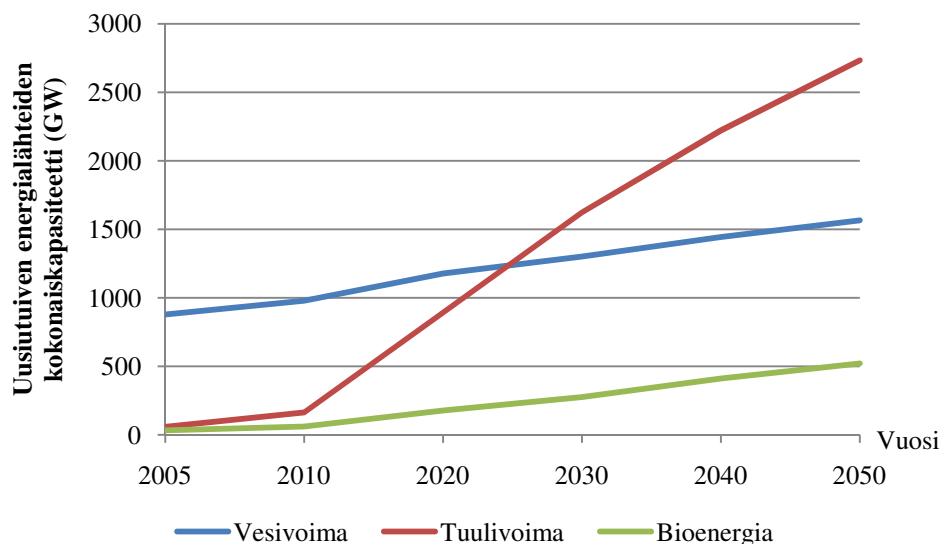
Bioenergian käyttö on kasvanut melko hitaasti viime vuosina verrattaessa sitä edellä esille tulleisiin energialähteisiin, esimerkiksi vuonna 2008 tuotantokapasiteettia lisättiin vain noin 2 GW. Vuoden 2008 lopussa olemassa olevaa kapasiteettia bioenergialle oli kuitenkin jo 52 GW. Bioenergialla tuotetaan jonkin verran sähköä nykyisin, esimerkiksi vuonna 2004 sitä tuotettiin noin 70 TWh. [REN09, EREC07b]

Bioenergia valmistetaan eloperäisestä biomassasta. Biomassa jaetaan yleensä kolmeen eri kategoriaan ominaisuuksien mukaan. Nämä kolme ryhmää ovat: puuperäiset aineet, jäte sekä biopolttoaineet. Puuperäisiin polttoaineisiin sisältyvät kaikki puusta valmistetut tuotteet sekä puuteollisuuden sivutuotteena syntyvät aineet. Jätteisiin kuuluvat kaikki hyödynnettävissä olevat jätteet sekä kaatopaikalta syntyvä metaanikaasu. Myös kasvien ja eläinten hyödynnettävissä olevat jäänteet luetaan tähän kategoriaan. [EIA] Biomassasta saatava energia tuotetaan yleensä sähkön ja lämmön yhteistuotannolla (Engl. Combined Heat and Power, CHP). Bioenergiaa käytetään myös laajalti vain lämmitykseen, etenkin kehitysmaissa polttopuu on hyvin yleinen lämmön lähde. Bio-

energian yksityiskäyttöä on hyvin vaikea arvioida ja virallisissa lähteissä esitetäänkin yleensä vain kaupallisiin tarkoituksiin tuotetun bioenergian kokonaismäärä.

Fotosynteesin kautta varastoituu kasveihin enemmän energiaa mitä maailmassa käytetään vuodessa. Maailmassa käytetyn ravinnon energiasisältö on noin yksi kahdessa-dasosa kaikesta fotosynteesin välityksellä sitoutuneesta energiasta. Biomassan energiankäytön lisääminen ei siten näyttäisi vaarantavan ravinnon tuotantoa, vaikka tällaisia väitteitä esitetäänkin hyvin laajalti. Huomattava energiankäytön lisääminen sitä vastoin voisi vaikuttaa haitallisesti maapallon ekosysteemiin, sillä suurin osa biomassasta on sitoutuneena puihin (noin 90 %). Energiasisällöltään se on verrattavissa fossiilisiin polttoaineisiin. Joillakin alueilla puun liikakäyttö on jo muodostunut ongelmaksi, sillä puun käytön ylittäessä sen vuotuisen kasvun metsäpinta-ala pienentyy ja samalla vuotuinen kasvu pienenee vuosi vuodelta. Eroosio kiihdyttää omalta osaltaan tätä kehää. Maailman metsien puuston tilavuus on noin $386 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, joka vastaa energiasisällöltään noin 1200 PWh. Jos puusto kasvaa vuosittain noin 4 %, niin energiaa olisi tällöin teoriassa saatavilla 48 PWh/a. Tämä energiamäärä riittäisi tyydyttämään tämän hetkisen sähkön-tuotannon energiatarpeen. Puuperäisen polttoaineen käyttö maailmanlaajuisesti on kuitenkin varsin vähäistä, sen määräksi on arvioitu vain noin 3-4 %. Pääosa maailman bioenergiasta perustuneekin maataloudesta peräisin olevaan biomassaan ja jätteiden energiankäyttöön. Tämän perusteella huoli ravinnon tuotannon muuttumisesta energiantuotannoksi onkin aiheellinen. [Ber06, Pel07]

Kuvassa 3.2. on esitetty vesivoiman, tuulivoiman ja bioenergian kokonaiskapasiteetin kehitys vuoteen 2050 asti. Vuodesta 2010 eteenpäin on kyseessä ennuste.



Kuva 3.2. Vesivoiman, tuulivoiman ja bioenergian kokonaiskapasiteetin kehitysen-nuste vuoteen 2050 asti. [EREC08a]

Kuvasta 3.2. voidaan huomata jokaisen energialähteen kohdalla selvä kasvu kapasiteetissa, mutta tuulivoiman kohdalla kasvu on hyvin huomattava. Tuulivoiman kokonaiskapasiteetin huomattavat kasvuluvut viime vuosilta tukevat hyvin kuvassa 3.2. näkyvää ennustetta.

3.2.2. Hintakehitys

Uusiutuvien energialähteiden kohdalla hintakehitys on melko samankaltaista. Eroja on tietysti todellisissa arvoissa, mutta käyrien suunta on samankaltainen: alaspäin. Suurin osa voimalan kustannuksista liittyy sen rakentamiseen, kuten esimerkiksi tuulivoiman kohdalla turbiinikustannukset, voimalan perustukset sekä verkkoonliityntäkustannukset aiheuttavat suurimman osan investointikuluista. Toisaalta taas voimalan käyttämä energia on pääsääntöisesti ilmaista, tosin bioenergia on tässä poikkeus. [EREC08a]

Verrattaessa uusiutuviin energialähteisiin perustuvien voimaloiden kustannusrakennetta sekä fossiilisia polttoaineita käyttävien voimaloiden kustannusrakennetta huomataan, että uusiutuvaan tekniikkaan perustuvan voimalaitoksen rakentaminen on hyvin pääomavaltaista. Noin 60 - 80 % kokonaiskustannuksista uppoaa rakentamisvaiheessa, kun taas perinteisten voimalaitosten kokonaiskustannuksista 40 – 70 % kuluu polttoaineeseen sekä käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin. Taulukossa 1 on esitetty tästä esimerkkinä tyypillisen 2 MW:n tuulivoimalan kustannusrakenne. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä suurempi uusiutuviin energialähteisiin perustuva voimalaitos on, sitä pienemmät ovat sähköenergian tuotantokustannukset. [EWEA09]

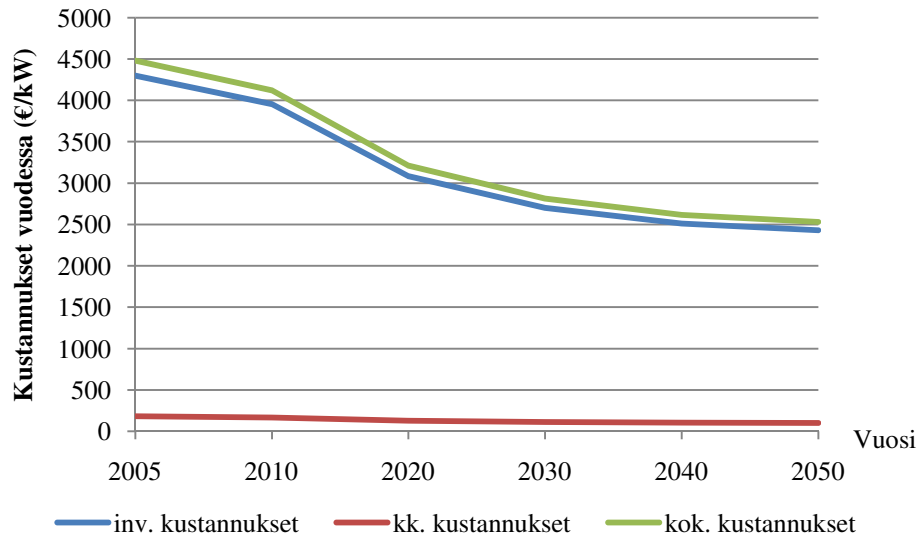
Taulukko 1. Tyypillisen 2 MW:n Eurooppaan asennetun tuulivoimalan kustannusrakenne. Laskelma on esitetty vuoden 2006 valuutassa. [EWEA09]

	Investointi (1 000 €/MW)	Osuus kokonaiskustannuksista (%)
Turbiini (tehdastoimittainen)	928	75,6
Verkkoonliityntä	109	8,9
Perustukset	80	6,5
Maan vuokraus	48	3,9
Sähköasennukset	18	1,5
Konsultointi	15	1,2
Taloudelliset kustannukset	15	1,2
Tien rakentaminen	11	0,9
Säätöjärjestelmä	4	0,3
Yhteensä	1 227	100

Taulukosta 1 voidaan todeta, että suurin yksittäinen kustannus tuulivoiman käytölle muodostuu turbiinin hankinnasta. Sama ilmiö on myös muiden uusiutuvien energialähteiden kohdalla. Investointikustannusten suuruus vaihtelee myös alueittain. Muutamien viime vuosien aikana niin erilaisten turbiinien kuin esimerkiksi aurinkokennojen hinnat ovat alkaneet laskea. Esimerkiksi tuulivoimaloiden turbiinien hinnat ovat vuosien 2008 ja 2009 aikana laskeneet noin 18 % ja todennäköistä on, että hinnat laskevat vielä tulevina vuosina lisää. [SusB09]

Käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat uusiutuviin energialähteisiin perustuvien voimaloiden kohdalla mitättömät verrattaessa investointikustannuksiin. Ne ovat vain

muutamia prosentteja investointikustannuksista. Viime vuosina myös käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat alkaneet laskea. [EREC08a] Kuvassa 3.3. on esitetty tuulivoimalan investointikustannusten sekä käyttö- ja kunnossapitokustannusten ennustettu kehitys vuoteen 2050 asti vuoden 2006 valuutassa.



Kuva 3.3. Ennuste tuulivoimalan investointi- sekä käyttö- ja kunnossapitokustannusten kehitykselle vuoteen 2050 asti. [EREC08a]

Kuvasta 3.3. voidaan nähdä huomattava kustannusten lasku, etenkin investointikustannusten ollessa kyseessä. Kuvasta voidaan huomata myös miten vähäinen osuus käyttö- ja kunnossapitokustannuksilla on voimalan kokonaiskustannuksiin. Osuuden on ennustettu yhä pienenevän tulevaisuudessa. Ennusteesta voidaan myös päätellä, että voimaloissa tarvittavien tekniikoiden hinnat tulevat laskemaan huomattavasti nykyisestä tasostaan tulevaisuudessa. Tekniikka tosin kehittyy huomattavaa vauhtia nykyisin, joten hinta-arvioita on hyvin vaikea tehdä ja ne vanhenevat nopeasti. Ennuste antaa kuitenkin hyvän yleiskuvan tulevasta hintakehityksestä. Hintoihin vaikuttaa tuotannon kehittyminen, joten kysynnän kasvulla on hyvin suuri vaikutus uusiutuvien energialähteiden hintakehitykselle. Ilmeistä kuitenkin on, että hinta halpenee ja sitä myötä uusiutuvilla energialähteillä tuotetun energia hinta laskee, joka puolestaan kasvattaa kysyntää.

4. AURINKOSÄHKÖ

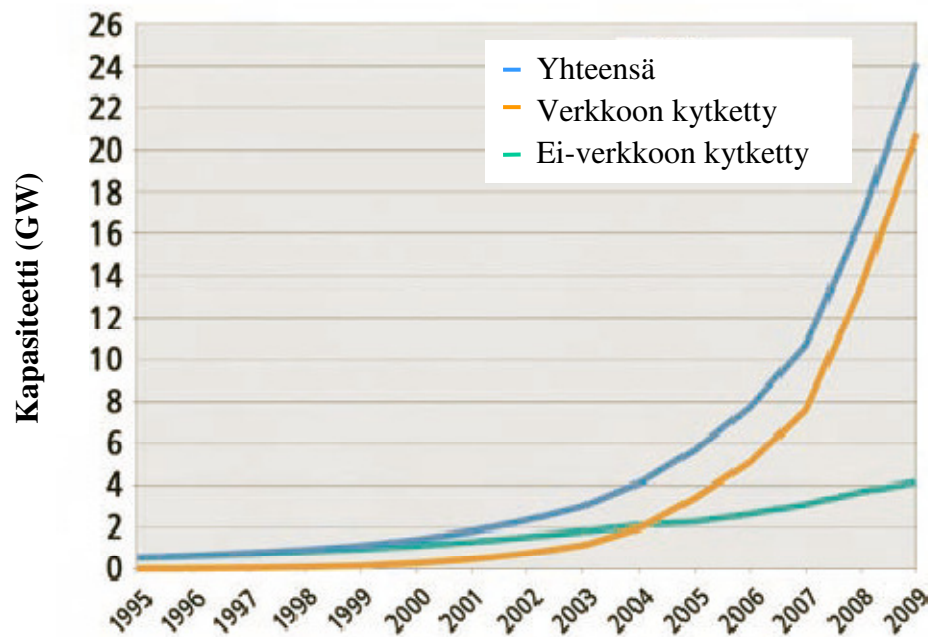
Aurinkosähkön käyttö on lisääntynyt huimasti 2000-luvun puolella. Kapasiteetti on lähes kaksikymmenkertaistunut sitten vuoden 2000. Kapasiteetin kasvulle ei näy loppua, sillä uusiutuvat energialähteet ovat tulleet jäädäkseen. Fossiilisten polttoaineiden väheneminen ja vähenemisestä johtuva hinnan nousu kannustavat tutkimaan vaihtoehtoja perinteisille energiantuotantomuodoille. Aurinkosähkö on hyvin mielenkiintoinen tutkimuskohde, sillä sen kapasiteetti on valtava verrattuna muihin energialähteisiin. Sitä on lisäksi saatavilla ympäri maapalloa, joten jokaisella valtiolla voi olla kapasiteettia omasta takaa. Hankaluus aurinkosähkön käytöllä on se, että auringon säteily jakautuu epätasaisesti niin ajan kuin paikankin suhteen.

Aurinkosähkön käyttö on lisääntynyt etenkin Euroopan alueella. Yksi syy tähän on EU:n ilmastopolitiikka. Suurin syy kuitenkin on suurimpien tuottajamaiden, Saksan ja Espanjan, harjoittama syöttötariffijärjestelmä. Järjestelmällä on hyvät sekä huonot puolensa. Sitä hyväksikäyttämällä saadaan investointeja aurinkosähkökapasiteettiin, mutta pitkällä tähtäimellä syöttötariffijärjestelmä ei kannata, sillä aurinkosähkön tulee olla yhtä kannattavaa kuin perinteiset sähköntuotantomuodot ennen kuin siitä tulee taloudellisesti kannattavaa.

Tässä luvussa käydään läpi aurinkosähkön käyttöä ja kapasiteettia. Luvussa käsitellään fotosähköiseen ilmiöön perustuvaa sähkön tuotantoa eli aurinkokennoilla tuotettavaa sähköä. Luvussa keskitytään lähinnä nykytilanteeseen, sillä tulevaisuutta analysoidaan tämän työn myöhemmässä luvussa. Lisäksi käydään läpi lyhyesti aurinkosähkön tuotantokustannusten muodostuminen sekä se, miten aurinkopaneelit siihen vaikuttavat.

4.1. Käyttö ja kapasiteetti

Aurinkosähkö on yksi tällä hetkellä nopeimmin kasvavista energialähteistä maailmalla. Aurinkosähkön kapasiteetti on valtava, se voisi yksistään kattaa koko maailman energian kulutuksen. Vuonna 2009 olemassa olevaa verkkoon kytkettyä aurinkosähkönkapasiteettia oli asennettu 21 GW. Määrä on toistaiseksi vielä pieni, mutta tämän hetkinen kasvuprosentti on valtava (yli 30 % vuodessa) ja kasvun ennustetaan jatkuvan samankaltaisena vielä kymmeniä vuosia. Kuvassa 4.1. on esitetty aurinkosähkön kapasiteetin kumulatiivinen kasvu aikavälillä 1995 – 2009.



Kuva 4.1. Aurinkosähkön tuotantokapasiteetin kasvu vuodesta 1995 vuoteen 2009. [REN10]

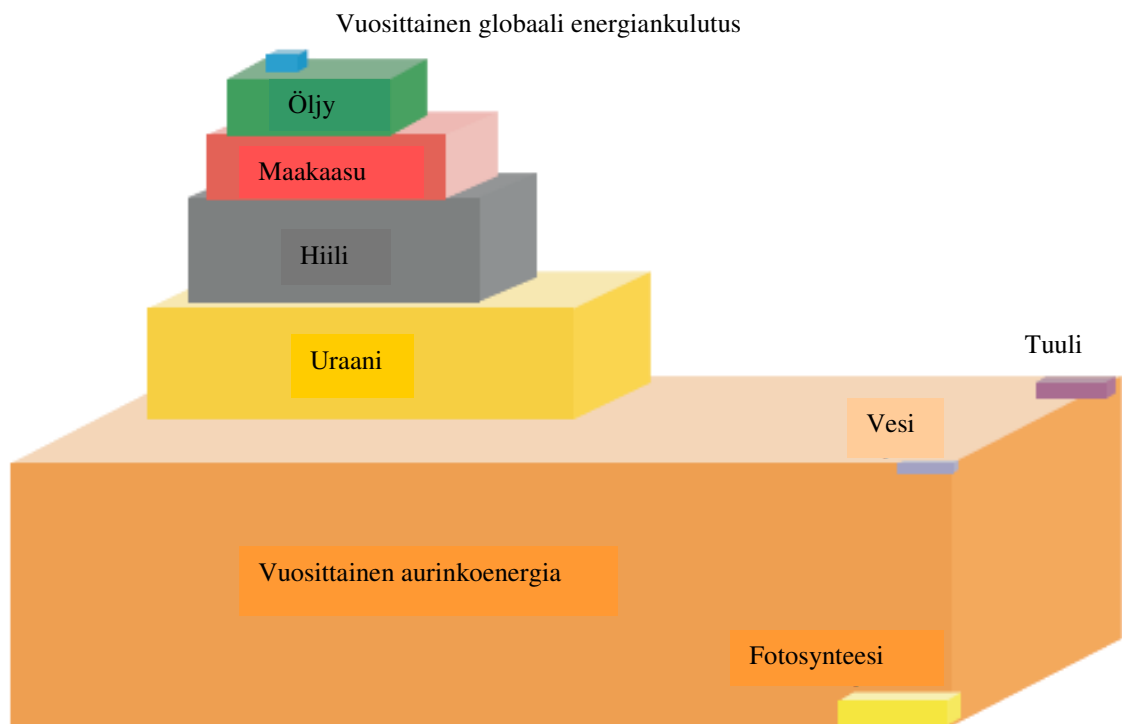
Kuvasta 4.1. huomataan, että aurinkosähkön kapasiteetin kasvu on alkanut kunnolla vasta 2000-luvun puolella. Käännekohtana voidaan pitää tämän tilaston valossa vuotta 2004, jonka jälkeen kapasiteetin kasvu on ollut huimaa. Kasvulle ei näy toistaiseksi loppua, sillä ennusteet aurinkosähkön kapasiteetin kasvulle ovat hyvin positiiviset. Vuoteen 2020 asti aurinkosähkön kapasiteetin ennustetaan kasvavan lähes 30 % vuodessa. Myös vuoden 2020 jälkeen kasvuennusteet ovat edelleen yli 20 % vuodessa. [EREc08a]

Kuvasta 4.1. voidaan todeta, että aurinkosähkökapasiteettia on kahta lajia: verkkoon kytkettyä ja ei-verkkoon kytkettyä. Verkkoon kytketty kapasiteetti on nimensä mukaan kytketty yleiseen sähköverkkoon. Verkkoon voidaan kytkeä niin suuri aurinkosähkövoimalaitos kuin myös pienempiä yksiköitä, esimerkiksi talojen katoilla olevia paneeleja. Verkkoon kytkennässä tuottaja syöttää ylijäämäenergiaa verkkoon ja saa siitä maksun. Tämä tapa tuottaa tosin haasteita tämän hetkiselälle sähköverkolle. Ei-verkkoon kytketty kapasiteetti on yleensä asennettu sellaiseen paikkaan, jossa ei ole yleistä sähköverkkoa lähellä. Silloin tarkoituksena on tuottaa tarvittava sähköenergia omaan käyttöön paneeleilla ja mahdollinen ylijäämäenergia varastoida akustoon myöhempää käyttöä varten. Tämä aurinkosähkökapasiteettityyppi ei kiinnosta tässä työssä, sillä sen käyttö on marginaalista. Ei-verkkoon kytkettyjen aurinkosähkönjärjestelmien kapasiteettia on lisäksi vaikea arvioida, koska sitä ei tilastoida.

Aurinkosähkön potentiaali on valtava. Kapasiteettia on käytössä vasta hyvin pieni osa verrattuna siihen kuinka paljon aurinko säteilee energiaa joka päivä maapallolle. Tilastojen mukaan aurinko säteilee maapallolle energiaa yli 10 000 kertaa enemmän mitä ihmiskunta käyttää. Keskimäärin maapallon joka neliömetrille säteilee vuosittain 1700 kWh energiaa. Auringon koko säteilyä ei kuitenkaan pystytä hyödyntämään energia tuotannossa. On arvioitu, että auringon energiasta noin 50 % (88 000 TW) voitaisiin

hyödyntää energian tuotannossa. Säteilyenergian laajamittaista hyödyntämistä vaikeuttaa säteilyn pieni tehotiheys sekä säteilytehon vaihtelu ajan ja paikan suhteen. Esimerkiksi Euroopassa neliömetrille säteilee vuosittain noin 1000 kWh kun taas Lähi-idässä neliömetrille säteilee vuosittain noin 1800 kWh. [Ber06, EPIA08]

Jos aurinkosähkön potentiaalia verrataan muihin energialähteisiin, niin huomataan sen suuruus. Tuulivoimasta on viime aikoina puhuttu paljon ja siihen on investoitukin huomattavia summia rakentamalla muun muassa uusia tuulipuistoja. Tuulivoiman hyödynnettävissä oleva kapasiteetti on eri lähteiden mukaan noin 2,3 TW, joka on huomattavasti pienempi kuin hyödynnettävissä oleva auringon säteily. Sama tilanne on myös muilla energialähteillä, niin uusiutuville kuin uusiutumattomilla. [Ber06] Kuvassa 4.2 on havainnollistettu tätä eroa resursseissa.



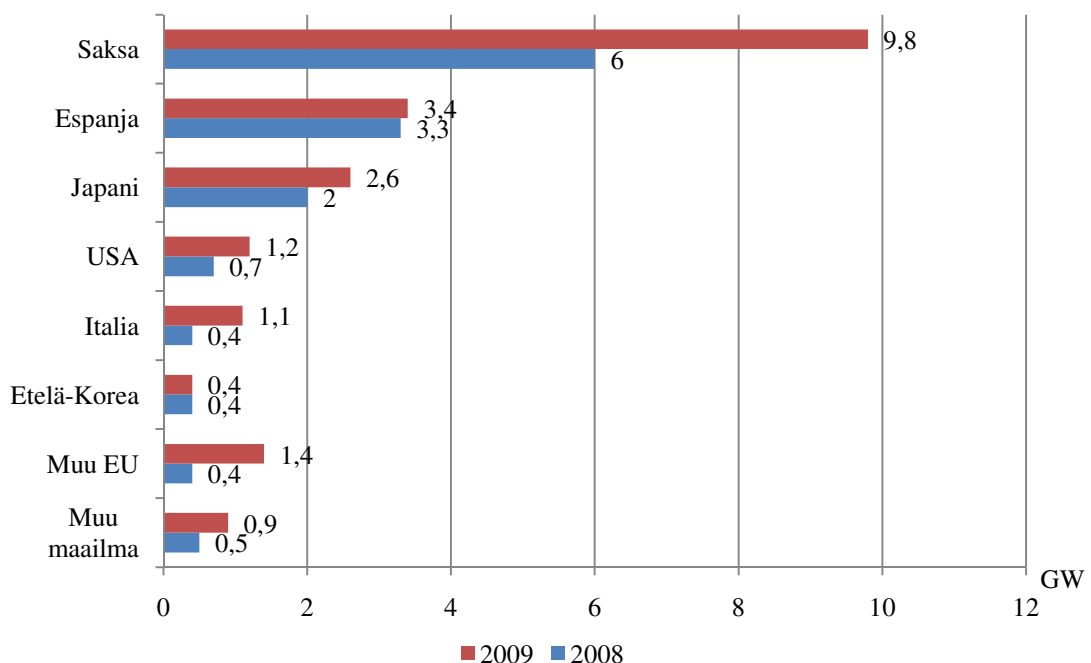
Kuva 4.2. Eri energialähteiden resurssien suuruudet verrattuna nykyiseen energian kulutukseen. [IEA08]

Kuva 4.2. havainnollistaa hyvin selvästi aurinkoenergian suuruutta muihin energialähteisiin verrattuna. Se on monisatakertainen etenkin muihin uusiutuviin energialähteisiin verrattuna. Fossiiliset polttoaineet ovat resursseiltaan suurempia tällä hetkellä kuin muut uusiutuvat energialähteet mutta häviävät myös aurinkoenergian resursseille. Aurinkoenergialla on myös se hyvä puoli, kuten myös muilla uusiutuvilla energialähteillä, että sitä ei voida kuluttaa loppuun toisin kuin fossiilisia polttoaineita. Aurinkoenergialla on siis valtavasti potentiaalia siihen nähden, että sitä nykyään vielä käytetään häviävän vähän.

4.1.1. Aurinkosähkö Euroopassa

Eurooppa on tällä hetkellä johtava alue aurinkosähkömarkkinoilla. Euroopassa on vuoden 2000 jälkeen panostettu uusiutuviin energialähteisiin ja tämä panostus näkyy myös aurinkosähkömarkkinoilla. Euroopan aurinkosähkökapasiteetti oli vuoden 2000 alussa varsin marginaalinen, mutta kymmenessä vuodessa kapasiteettia on lisätty niin paljon, että Eurooppa on tällä hetkellä ensimmäinen aurinkosähkötilastoissa. Euroopassa on tällä hetkellä noin 16 GW aurinkosähkökapasiteettia, joka on yli 70 % koko maailman asennetusta aurinkosähkökapasiteetista. Muita merkittäviä alueita aurinkosähkön asennetussa kapasiteetissa ovat Yhdysvallat sekä Japani. Yhteensä näillä kolmella alueella on yli 90 % maailman aurinkosähkön kokonaiskapasiteetista. [REN10]

Euroopan alueelta erottuvat selvästi muutamat valtiot, jotka ovat kunnostautuneet aurinkosähkökapasiteetin kasvattamiseen. Johtavat maat Euroopassa tällä hetkellä ovat Saksa ja Espanja. Saksassa on edelleen eniten asennettua aurinkosähkökapasiteettia, vuoden 2009 lopussa 9,8 GW. Saksa on itse asiassa johtava maa myös globaalisti. Espanjassa on huomattava määrä asennettua aurinkosähkökapasiteettia, vuoden 2009 lopussa 3,4 GW. Myös muut Euroopan maat ovat kunnostautuneet aurinkosähkökapasiteetin asennuksessa, etenkin Italia ja Ranska ovat viime vuosina panostaneet aurinkosähkökapasiteetin kasvattamiseen. Kuvassa 4.3. on esitetty eri maiden osuudet aurinkosähkökapasiteetista vuosina 2008 ja 2009. [REN10]



Kuva 4.3. Aurinkosähkön tuotantokapasiteettien jakautuminen alueittain vuonna 2008 ja 2009. [REN10]

Kuvasta 4.3. voidaan todeta se, että huomattavin osuus aurinkosähkökapasiteetista on Saksassa, Espanjassa ja Japanissa. Aurinkosähkön huomattava osuus sekä sen vuosittainen kasvu Saksassa johtuu siellä harjoitettavasta ilmastopolitiikasta: Tuottaja saa

takuuhinnan verkkoon myytävästä sähköstä, jos se on tuotettu uusiutuvalla energialähteellä. Saksan lakia syöttötariffijärjestelmästä ovat kopioineet myös muun muassa Espanja ja Japani, jotka tässä tilastossa ovat kärjessä.

4.2. Tuotantokustannukset

Aurinkosähkön tuotantokustannukset vaihtelevat melko paljon. Syy tähän on se, että aurinkosähköjärjestelmät vaihtelevat hyvin paljon eri puolilla maailmaa: koot vaihtelevat, tuotantopaikka vaikuttaa tuotantokustannuksiin ja tekniset yksityiskohdat vaihtelevat globaalisti. [IEA03] Aurinkosähkölle voidaan kuitenkin laskea tuotantokustannukset. Niiden laskennassa otetaan huomioon muun muassa oppimiskäyrän vaikutus.

Aurinkosähkön kustannukset voidaan jaotella investointikustannuksiin, käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin sekä tuotantokustannuksiin. Aurinkosähkön investointikustannukset ovat nykyään vielä suuret. Keskimääräinen investointikustannus on noin 5-9 €/W. Tätä alempia investointikustannuksia on kuitenkin nähty markkinoilla. Investointikustannukset vaihtelevat riippuen paikallisista markkinoista sekä teknisistä spesifikaatioista. Sitä vastoin käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat hyvin merkityksettömät ja yleensä ne eivät riipu paikasta. [IEA03]

Oppimiskerroin on vaikuttanut aurinkosähkön tuotantokustannuksiin. Esimerkiksi LR-luvun (Engl. Learning Rate) ollessa 0,15 tuotantokustannukset laskevat 15 %, kun olemassa oleva kapasiteetti kaksinkertaistuu. LR-luku on suhdeluku, joka kuvaa kustannusten pienentymistä, kun kumulatiivinen tuotantomäärä kaksinkertaistuu. LR-lukua käsitellään tarkemmin luvussa 5.3. Aurinkosähkön LR-luku on kasvanut 0,15:sta 0,2:een parissa vuosikymmenessä. Se on aiheuttanut merkittävän kustannusten alenemisen 1990-luvulta lähtien. Vuodesta 2004 lähtien on ollut havaittavissa aurinkosähkön kustannuksissa hienoista kasvua. Tämä on johtunut lähinnä kysynnän kasvusta sekä puhdistetun piin puutteesta. Pii on aurinkokennomateriaalina käytetty, joten sen hinnan muutokset vaikuttavat suoraan aurinkosähkön kustannuksiin. Aurinkopaneelit aiheuttavatkin noin 60 % aurinkosähkön kokonaiskustannuksista sisältäen asennuksen sekä muut tarvittavat osat paneeliston toimintaan liittyen. Kustannusten kasvua on hillitty tuomalla markkinoille uusia kennomateriaaleja sekä kehittämällä perinteistä kennojen tuotantotekniikkaa. On ennustettu, että lisääntyvä ohutkalvotekniikka kennoissa tulee pudottamaan aurinkosähköjärjestelmien hintaa yli 20 %. [IEA08]

Investointikustannukset ovatkin yksi merkittävin osa aurinkosähkön tuotantokustannuksista, sillä käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat merkityksettömät aurinkosähkön kokonaiskustannuksissa. Ne kattavat vain 1-3 % kokonaiskustannuksista. Aurinkosähköpaneelien käyttöikä on 20-30 vuotta, sitä vastoin invertterit ja akustot tulee uusia 5-10 vuoden välein, joten nämä lisäävät osaltaan kunnossapitokustannusten suuruutta. [IEA03]

Aurinkosähkön tuotantokustannuksiin vaikuttavat investointikustannukset, auringon säteily sekä aurinkosähköjärjestelmästä saatava sähköenergia. Tämän hetkinen aurinkosähkön tuotantokustannus on tyypillisesti noin 0,2-0,3 snt/kWh. Tätä korkeampia tuotantokustannuksia myös löytyy, sillä aurinkosähköä tuotetaan hyvin erilaisissa olo-

suhteissa sekä erikokoisilla järjestelmillä. Aurinkosähkön kustannukset ovat laskeneet huomattavasti sen jälkeen, kun ensimmäiset aurinkosähköjärjestelmät tulivat markkinoille. Kustannusten alenemiseen vaikuttivat muun muassa seuraavat tekijät: tekniset innovaatiot ja parannukset, parantunut laatu, aurinkosähköjärjestelmän eliniän nousu sekä mittakaavaedut. Nämä tekijät vaikuttavat edelleen kustannuksiin alentavasti. [IEA03, EPIA08]

Tuotantokustannusten lähempi tutkiminen on osoittanut, että niihin vaikuttaa hyvin paljon auringon säteily. Tutkimista on helpottanut se, että järjestelmissä on käytetty samoja komponentteja eri alueilla. Tällä on eliminoitu järjestelmien eroavaisuuksista johtuvat kustannuserot. Esimerkiksi Saksassa tuotetaan aurinkosähköjärjestelmällä vain 110 kWh/m² vuodessa kun taas sama järjestelmä tuottaa Kaliforniassa 190 kWh/m² vuodessa. Eron selittää ainoastaan auringon säteilyn erot näillä kahdella eri alueella. Kustannukset olivat noin 40 % pienemmät alueella, jossa säteily on 70 % suurempaa. [IEA03]

Aurinkosähkön tuotanto on vielä kehittyvä tekniikka, joten sitä tutkitaan edelleen sekä kehitetään uusia materiaaleja sekä tekniikoita esimerkiksi kennojen hyötysuhteen parantamiseksi. Tutkimus ja tuotekehitys tuo osansa aurinkosähkön tuotantokustannuksiin.

4.2.1. Aurinkokennot

Aurinkosähkökennot vaikuttavat hyvin suuresti aurinkosähkövoimalaitosten investointikustannuksiin, sillä noin 60 % investointikustannuksista koostuu aurinkokennoista. Sen vuoksi kennojen hinnan muutokset sekä niiden hyötysuhteiden parantuminen vaikuttavat suoraan aurinkosähkön tuotantokustannuksiin. Kennojen päämateriaalina käytetään piitä. Piin hinta on ollut nousussa viime vuosina, mutta on pysynyt vielä kohtuullisen matalana. Kennoteknologioita on useita. Tällä hetkellä käytetyin teknologia on kiteinen pii. Se edustaa tällä hetkellä 85 - 90 % maailman kennomarkkinoista. Kiteinen pii jaetaan yksikiteiseen (sc-Si) sekä monikiteiseen piihin (mc-Si). Toinen merkittävä kennoteknologia on ohutkalvotekniikka. Se edustaa tällä hetkellä 10–15 % maailman kennomarkkinoista. Ohutkalvotekniikalla tuotettuun kennoon tarvitaan vähemmän piitä kuin tavanomaiseen kidekennoon, joten tuotantokustannukset alenevat käytettäessä ohutkalvotekniikkaa. On myös kehitteillä muita teknologioita kennojen valmistukseen, mutta ne ovat niin marginaalisia, että niillä ei ole vielä käytännön merkitystä. [IEA10a]

Kiteinen pii on tällä hetkellä käytetyin tekniikka markkinaosuuden perusteella. Osuuden ei uskota muuttuvan vielä moneen vuoteen, sillä tämä teknologia on vakiinnuttanut asemansa. Kennomateriaaleista kiteisellä piillä on parhain hyötysuhde tällä hetkellä sekä se on luotettava materiaali aurinkokennoihin. Huonoa kiteisen piin käytössä on se, että sitä tarvitaan kennoon tekoon runsaasti. Mikäli piin markkinahinta nousee huomattavasti, se voi vaikuttaa kennojen tuotantotekniikoihin nopeuttaen ohutkalvotekniikan läpilyöntiä. Kiteiseen piihin perustuvaa teknologiaa kehitetään kuitenkin edelleen, joten raaka-aineiden käyttömäärät sekä hyötysuhde voi tämän hetkisestä vielä parantua merkittävästi. [IEA08]

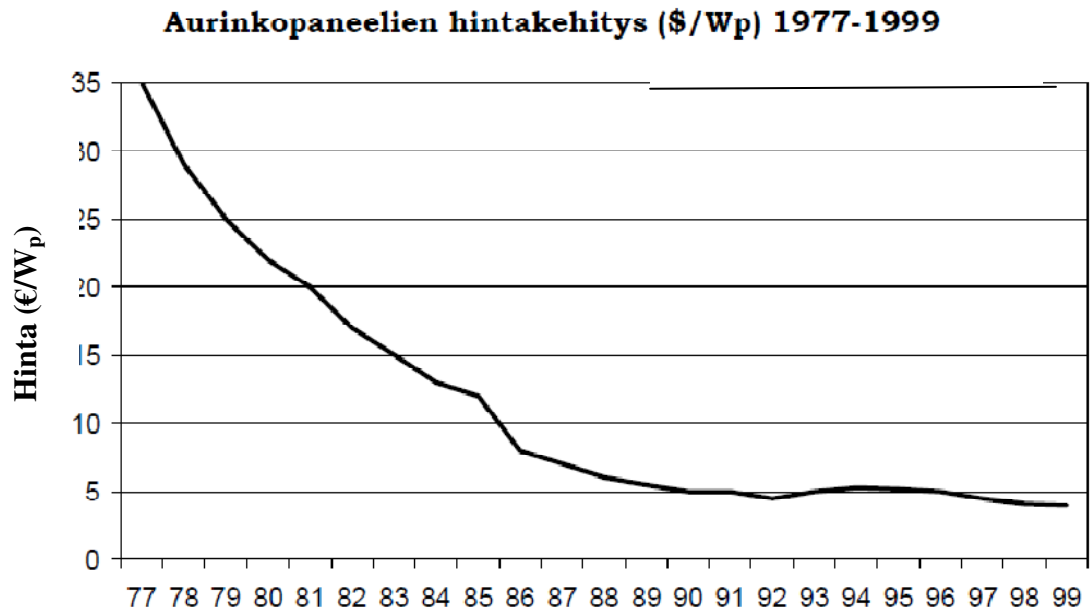
Ohutkalvotekniikka on täysin erilainen verrattuna kiteisen piin tekniikkaan. Käytettäessä kiteistä piitä, siitä yleensä tehdään määrätyn paksuisia kiekkoja, joista kootaan aurinkokenno. Kennoja yhdistelemällä saadaan aikaiseksi aurinkopaneeleja. Ohutkalvotekniikka taas perustuu valoherkän materiaalin ohueen kerrostamiseen edulliselle materiaaalialustalle. Ohutkalvotekniikan etuja on edullisten tuotantokustannusten lisäksi alhainen paino, tasainen laatu sekä automatisoitu valmistus. Haittoja ohutkalvotekniikassa on alhaisemman hyötysuhteen lisäksi vähäinen kokemus käyttöiästä. Tekniikassa voidaan hyödyntää piin lisäksi myös muita materiaaleja. Käytetyimpiä materiaaleja amorfisen piin (a-Si) lisäksi ovat kupari-indium-diselenidi (CIS), kupari-indium-gallium-diselenidi (CIGS) sekä kadmium-telluridi (CdTe). Amorfinen pii on näistä kuitenkin merkittävin valmistuksen ja asennuksen kannalta. [IEA08] Taulukossa 2. on esitetty näiden kennotekniikoiden hyötysuhteet.

Taulukko 2. Kiteisen piin sekä ohutkalvotekniikan avulla tehtyjen kennojen hyötysuhteet. [IEA10a]

Kennojen hyötysuhteet				
Kiteinen pii		Ohutkalvotekniikka		
sc-Si	mc-Si	a-Si	CdTe	CIS/CIGS
14-20 %	13-15 %	6-9 %	9-11 %	10-12 %

Taulukosta 2 käy hyvin esille kiteiseen piihin perustuvan tekniikan sekä ohutkalvotekniikan hyötysuhteiden erot. Hyötysuhteet eivät ole millään olemassa olevalla tekniikalla tällä hetkellä kovin korkeat, mutta kehitystä on hyötysuhteissa tapahtunut menneisyydessä ja odotettavissa on, että hyötysuhteet paranevat tulevaisuudessa tekniikan kehittyessä. Hyötysuhteiden ollessa näin matalat, niin pienikin ero vaikuttaa suuresti siihen mitä tekniikkaa kannattaa hyödyntää kaupallisesti. Kiteisen piin ylivoimaisesti paras hyötysuhde on yksi selittävä tekijä sille, miksi sen markkinat ovat suurimmat tällä hetkellä.

Kennojen markkinahinnat ovat laskeneet huomattavasti 1990-luvulta lähtien. Syitä laskuun on muun muassa kysynnästä aiheutunut tekniikan parantaminen sekä tuotantotekniikoiden ja materiaalien tehokkaampi käyttö. Markkinahintojen ennustetaan laskevan edelleen, sillä etenkin ohutkalvotekniikan lisääntyvä käyttöönotto kennoteknologiassa ennustaa kustannusten suurta laskua tuotannossa. Kiteisen piin tekniikassa on onnistuttu pienentämään piin käyttöä pienentämällä kiekkojen paksuutta. Tämä myös selittää osaltaan kennojen markkinahintojen laskua. Kuvassa 4.6. on esitetty aurinkopaneelin keskimääräinen hintakehitys vuodesta 1977 vuoteen 1999.



Kuva 4.6. Aurinkopaneelien hintakehitys vuodesta 1977 vuoteen 1999 asti. [Sol01]

Kuvasta 4.6. voidaan todeta, että aurinkopaneelien hinnat laskivat reilussa kahdessa-kymmenessä vuodessa liki 90 %. Tällä hetkellä aurinkopaneelin hinta on noin 2 €/W_p. Käyrä on vanha, mutta antaa hyvän kuvan aurinkopaneelien hintakehityksestä. Aurinkokennotekniikat ovat kehittyneet huomattavasti viimeisen kymmenen vuoden aikana ja voidaan olettaa kehityksen suunnan pysyvän samana myös tulevaisuudessa. Hintoihin vaikuttavat tuotannon kehittyminen eri komponenttien ja tekniikoiden osalta, joten kysynnän kehittymisellä on hyvin suuri vaikutus aurinkopaneelien hintakehitykselle.

5. TEKNOLOGISEN KEHITTÄMISEN ENNUSTAMINEN

Teknologia kehittyy nykyään huimaa vauhtia, nopeammin kuin koskaan ennen. Tämä luo toisaalta mahdollisuuksia, mutta myös haasteita teknologiayrityksille. Yritysten pitää pysyä kehityksessä mukana, mutta myös yrittää itse kehittää ja luoda uutta. Haasteita tähän tuo se, että kehityksen ennustaminen on vaikeaa, sillä kukaan ei pysty sanomaan tarkasti mihin kehitys johtaa ja mitä uutta tulevaisuudella on tarjota. Tämän haasteen voittamiseksi on kehitetty erilaisia ennustamismenetelmiä, jotka perustuvat joko historialliseen dataan, asiantuntijoiden arvioihin tai niiden molempien sekoitukseen.

Teknologisen kehityksen mahdollisimman tarkka ennustaminen tuo yritykselle kilpailuetua muihin nähden, sillä ennusteen avulla pystytään tekemään ohjausliikkeitä omaan liiketoimintaan siten, että se tuo tulevaisuudessa suurimman hyödyn teknologiasta kehityksestä. Tähän liittyy kuitenkin riskinä se, että jos ennuste ei täsmää tulevaisuudessa niin yritys voi joutua pahoihin ongelmiin ennusteen mukaan tehtyjen ohjausliikkeiden vuoksi. Tästä syystä ennustamismenetelmistä saatuihin tuloksiin pitää suhtautua pienellä varauksella.

Tämä luku käsittelee yleisimpiä ennustamismenetelmiä, kuten esimerkiksi teknologista diffuusiota sekä S-käyrää. Luvussa käsitellään myös oppimiskäyrä, mikä on yksi tärkeimmistä apuvälineistä hahmotettaessa teknologista kehittymistä. Luvun tarkoituksena on esitellä nämä eri menetelmät, ei niinkään opastaa niiden käytössä eikä käydä niitä yksityiskohtaisesti läpi.

5.1. Teknologisen kehityksen ennustamismenetelmistä

Teknologisen kehityksen mallintamisessa mielenkiinnon kohteena on yleensä miten jokin asiantila, parametri tai muuttuja on käyttäytynyt menneisyydessä ja miten se mahdollisesti tulee käyttäytymään tulevaisuudessa. Hankalaksi asian tekee se, että varmaa tietoa on mahdollista saada vain menneisyydestä. Menetelmänä voi periaatteessa käyttää mitä vain, sillä tavoitteena on muodostaa käsitys ilmiön kehityksen logiikasta ja tämän perusteella ennustaa, miten ilmiö tulee tulevaisuudessa kehittymään. Yleisenä periaatteena teknologisen kehityksen mallintamisessa on pidetty sitä, miten mallintamisen kohteena oleva ilmiö tulee kehittymään. Kantaa ei oteta siihen, miten kehitys aikaansaadaan tai mikä sen saa aikaan. Tällaisessa tilanteessa on kuitenkin vaarana jättää huomiotta teknologinen epäjatkuvuus, jolloin kehityksen logiikka muuttuu. Siitä syystä ennustamisessa ei tule ylenkatsoa turhaltakaan tuntuvaan tietoa joka ilmiöön liittyy. [Mäk06]

Yhtenä erittäin tärkeänä seikkana ennustamisessa voidaan nähdä se, että tulevaisuus ei ole ennalta määrätty, joten siihen voidaan vaikuttaa erilaisilla valinnoilla. Varmana voidaan pitää vain sitä, että mitä pidemmälle kehitystä ennustetaan sen suuremmaksi ennusteen virhemahdollisuus kasvaa. Teknologinen kehityskin on siis riippuvainen tämän hetken valinnoista ja yleisestä tahtotilasta. Haasteena onkin ymmärtää kehityksen

etenemislogiikka niin hyvin, että kehityksen kulku voidaan ennustaa yksikäsitteisesti sekä riittävän tarkasti. [Mäk06]

Teknologisen kehityksen ennustaminen voidaan yleisesti jakaa kahteen kategoriaan: Kvantitatiiviseen (määrälliseen) sekä kvalitatiiviseen (laadulliseen). Kvantitatiiviset menetelmät tutkivat mitattavissa olevia suureita ja pyrkivät usein selittämään eri muuttujien suhteita toisiinsa. Lähtökohtana kvantitatiivisille menetelmille on historiallisen datan olemassaolo sekä sen luotettavuus. Oletuksena on myös se, että historiallinen data voidaan esittää numeerisessa muodossa. Lisäksi oletetaan kvantitatiivisten menetelmien käytössä, että historiallisesta kehityksestä on löydettävissä trendejä, joita voidaan käyttää tulevaisuuden ennustamiseen. Kvantitatiivisia menetelmiä kritisoidaan yleisesti siitä, että ne olettavat historian toistavan itseään. Historiasta löytyy kuitenkin useita eri tilanteita, joissa tulevaisuutta voidaan ennustaa, ainakin jollain tasolla. [Mäk06]

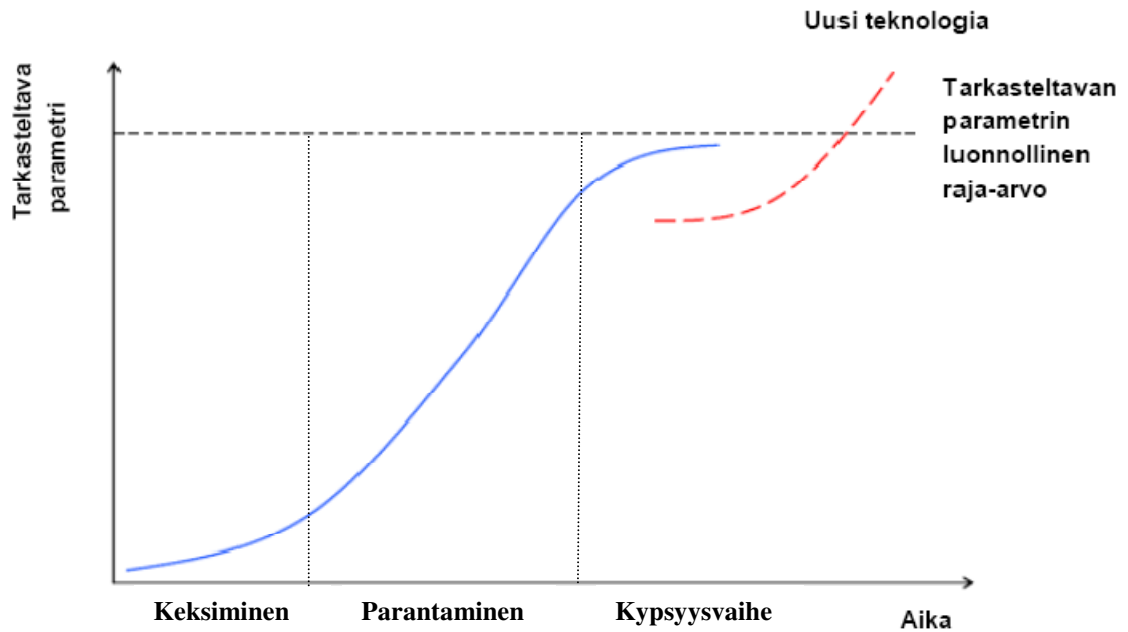
Kvalitatiiviset menetelmät eivät puolestaan vaadi samankaltaista olemassa olevaa dataa ja sen esitystä kuin kvantitatiiviset menetelmät. Nämä menetelmät vaativat yleensä inhimillistä panosta sekä tulkintaa. Tyypillisesti kvalitatiivissa menetelmissä käytetään hyödyksi asiantuntijoita sekä heidän mielipiteitään. Kvalitatiivisen tutkimuksen tuloksia on vaikea arvioida etukäteen ja tulosten virhearviointi on hankalaa, joskaan ei mahdotonta. Tärkeintä käytännön kannalta on tulkita tuloksia tilanteen mukaan sekä saada mahdollisimman monta erilaista näkökulmaa tutkittavaan ongelmaan. [Mäk06]

5.1.1. Teknologian kehittyminen

On järkevä ajatella, että teknologialla, kuten tuotteellakin, on elinkaari, jota teknologisen kehitys noudattaa. Ihminen on luontaisesti utelias ja kiinnostunut oman elinympäristönsä kehittämisestä, joten teknologinen kehittyminen seuraa yleensä havaitusta puutteesta tai aivan uudesta tarpeesta. Teknologinen kehitys on yleensä hyvin pitkä ja moninainen prosessi, johon vaikuttavat käsillä olevat resurssit, teknologian tarkoituksenmukaisuus sekä regulaatio. Alkuvaiheessa uuteen teknologiaan käytetään valtaisesti aikaa sekä rahaa järjestämällä erilaisia tutkimus- ja kehityshankkeita teknologian ympärille. Julkisen sektorin mukaan saaminen kasvattaa uuden teknologian kasvumahdollisuuksia ja tätä kautta lisää sen kiinnostavuutta suuren yleisön keskuudessa. Tutkimus- ja tuotekehittelyprosesseihin suunnatut varat yleensä pienentävät teknologian kustannuksia, joka myös itsessään herättää suuren yleisön mielenkiinnon. Kustannusten pieneneminen ja markkinaosuuksien suureneminen synnyttääkin yleensä positiivisen kierteen, joka nopeuttaa teknologian markkinoillepääsyä. Yleisesti voidaankin sanoa, että markkina-kehitys ja teknologinen kehitys kulkevat käsi kädessä. [Mäk09, OECD03]

Teknologian kehitys nähdään yleisesti suorituskyvyn kasvuna, mutta teknologista kehittymistä voidaan tarkastella myös monesta muusta eri näkökulmasta. Tärkeimmät kehityksen ilmentymät ovatkin suorituskyvyn lisäksi hinta, suorituskyvyn ja hinnan välinen suhde, myyntimäärä (absoluuttisesti) sekä markkinaosuus (suhteellisesti). Teknologista kehitystä voidaan tarkastella esimerkiksi sen kehityskaarta seuraamalla. Teknologinen kehityskaari voidaan jakaa ajan mukaan eri vaiheisiin. Kehityskaari alkaa

teknologian keksimisestä jota seuraa parannusvaihe. Lopulta teknologian kehitys pysähtyy ja sitä seuraa kypsyysvaihe, josta seurauksena on yleensä teknologian hylkäys ja uuden käyttöönotto. [Mäk06] Teknologinen kehityskaari noudattaakin geneerisesti S-käyrää, joka on esitetty kuvassa 5.1.



Kuva 5.1. Periaatekuva teknologian kehityksestä ja siinä tapahtuvasta epäjatkuvuudesta. [Mäk06]

Kuvasta 5.1. voidaan huomata teknologian kehityksen kolme eri vaihetta. Aluksi teknologian kehitys on hyvin hidasta, mutta alkaa ajan myötä nopeutua. Lopulta se saavuttaa saturaatiotason, eikä sitä tämän jälkeen enää kannata tai voi kehittää, sillä se ei ole taloudellisesti kannattavaa tai se ei enää lisää teknologiaan mitään uutta. Tällöin siirrytään uuteen teknologiaan ja uudelle S-käyrälle. Tämä ilmenee kuvassa 5.1. punaisella katkoviivalla piirrettynä. Yleensä uuden teknologian S-käyrän alkupää on matalammalla tasolla kuin vanhan teknologian loppupää, mutta yleisesti ottaen uusi teknologia on potentiaaaliltaan korvattavaa parempi. [Mäk06]

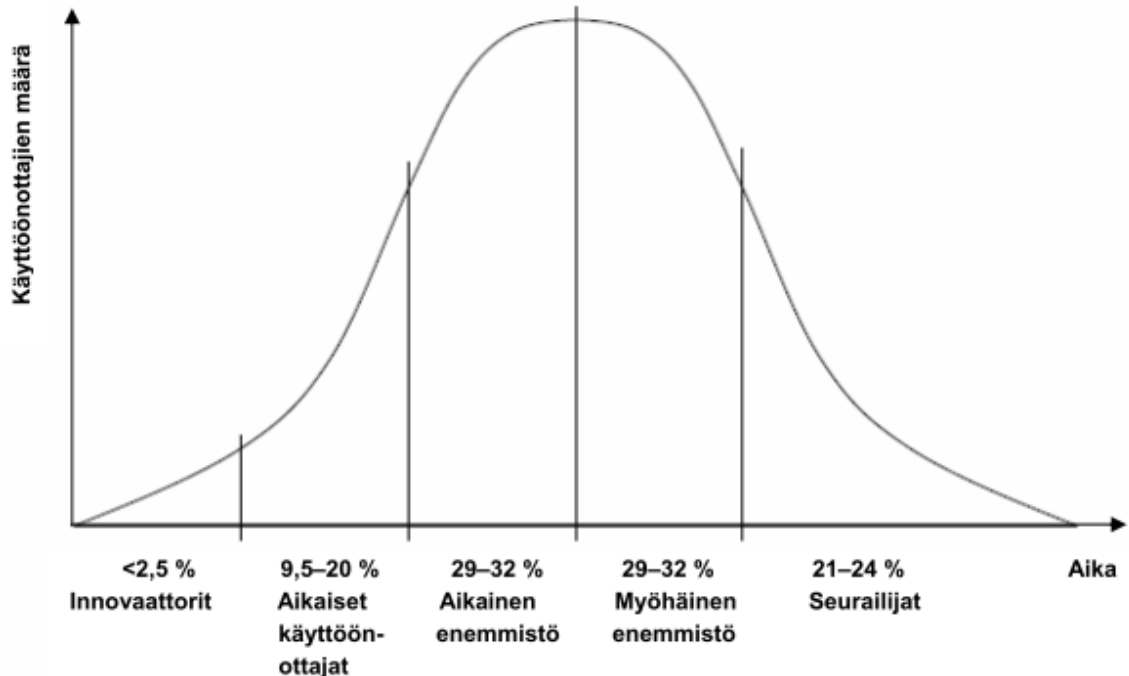
5.2. Teknologinen diffuusio

Diffuusio on ilmiönä hyvin helppotajuinen. Tuote, teknologia tai jokin muu tarkastelun kohde diffusoituu eli leviää tarkasteltavan populaation yli. Se on lähes analoginen esimerkiksi epidemiamallin kanssa, jossa tietty sairaus leviää tarkasteltavan populaation yli. [Mäk06] Diffuusiomalleja on olemassa useita, mutta tässä luvussa käydään läpi vain yksi sen perusmalleista. Sitä soveltamalla voidaan ennustaa teknologian yleistymistä tiettyjen ennalta asetettujen ehtojen toteutuessa.

5.2.1. Diffuusiosta yleensä

Diffusioituminen tapahtuu yleensä samalla tavalla, ajallisesti tapahtuma voi vaihdella. Vaikka diffuusioita tarkastellaan yleensä jonkin tietyn populaation yli, kuten esimerkiksi matkapuhelimien yleistymisen tarkastelu Suomessa 1990-luvulla, voidaan diffuusio ilmiönä tunnistaa myös erillisissä organisaatioissa ja muissa ryhmittymissä. Teknologian diffuusio riippuu kuitenkin tarkasteltavasta teknologiasta ja on siten toimialakohtaista, toisin kuin yleismaailmallinen, kaikkia koskettava diffuusio. [Rog03]

Diffuusio on yleensä prosessi, johon liittyy neljä eri elementtiä: innovaatio itse, kommunikointikanavat, aika ja sosiaalinen järjestelmä. Nämä vaikuttavat siihen kuinka laajalle ja kuinka nopeasti jokin tuote tai teknologia yleistyy. Tunnusomaista diffuusiolle on sen käyrämuoto, joka esittää hankintapäätösten kumulatiivista määrää diffuusio-prosessissa. Käyrä on kuvan 5.1. S-käyrän kaltainen, joten sitä ei tässä yhteydessä esitetä uudestaan. Diffuusion S-käyrästä nähdään hyvin kuinka diffuusio etenee. Alkuun esiintyy vain ns. innovaattoreita, jotka tekevät päätöksen ulkoisten vaikuttimien perusteella. Heitä seuraavat muut ryhmät, jotka ottavat teknologian käyttöön omassa tahdissaan. Lopulta seuraa saturaatiotaso, jonka jälkeen tuote on kaikilla sitä haluavilla. Tosin olemassa on myös sellaisia tuotteita, joilla tätä saturaatiotasoa ei esiinny lainkaan. [Rog03, Arm01] Kuvassa 5.2. on esitetty nämä eri ryhmät sekä heidän osuutensa koko tarkasteltavasta populaatiosta.



Kuva 5.2. Teknologian yleistyminen populaatiossa sekä teknologian käyttöönottajien ryhmät ja niiden prosentuaaliset osuudet koko populaatiosta. [Mäk06]

Kuvasta 5.2. voidaan nähdä eri asiakassegmentit ja heidän osuutensa koko populaatiosta. Malli kuvaa lähinnä jonkin tuotteen diffusioitumista populaation ylitse, mutta sitä

voidaan tietyiltä osin soveltaa myös teknologian diffuusoitumiseen. Jos diffuusiota sovelletaan energiantuotantoteknologioihin, voidaan huomata, että suurin yksittäinen tekijä uuden teknologian yleistymiseen on teknologioiden suhteellinen kilpailukyky. Suhteellinen kilpailukyky kuvaa uuden teknologian kilpailukykyä vanhan tai vielä markkinoilla olevien teknologioiden kanssa. Teknologian kilpailukyky suhteutetaan usein siitä saatavan oletettavan hyödyn ja siitä aiheutuvien kustannusten kesken. Mitä suurempi on teknologian kilpailukyky sen houkuttelevammalta se näyttää ja sitä nopeammin se yleistyy markkinoilla. Toinen merkittävä tekijä uusien energiantuotantotekniikoiden yleistymisessä on niiden yhteensopivuus vanhojen tekniikoiden kanssa. Yhteensopivuus kuvaa sitä, miten hyvin uusi teknologia sopii käyttöönottajien arvojen, odotusten sekä tarpeiden kanssa ja miten hyvin se on teknisesti yhteensopiva siihen liitännäisten teknologioiden ja järjestelmien kanssa.

5.2.2. Diffuusion mallintaminen

Teknologian diffuusion tutkiminen aloitettiin jo 1940- ja 1950-luvuilla. Aluksi keskityttiin tutkimaan lähinnä maataloudessa esiintyvien innovaatioiden diffuusiota maanviljelijöiden keskuudessa sekä uusien opetusideoiden leviämistä opettajistossa. Vähitellen diffuusion tutkiminen levisi markkinointiin, joka 1960-luvulla kasvatti suosiotaan. Diffuusion perusmalleista sovellettiin yhä uusia malleja vastaamaan monimutkaistuneita tilanteita. Nykyään diffuusiosta on esitetty jo monia erilaisia malleja, mutta tässä luvussa käsitellään ainoastaan yhtä yksinkertaisimmista diffuusion perusmalleista. Lisää malleja löytyy esimerkiksi kirjallisuusviitteestä Arm01. [Rog03, Arm01]

Diffuusiomallin avulla voi tehdä keskipitkän ja pitkän aikavälin ennusteita, estimoida saturaatiotasoa sekä estimoida ajan ja volyymin huippua diffuusiossa. Diffuusiomallien avulla voidaan tehdä myös lyhyen aikavälin ennustamista, josta voi olla apua myös pidempien aikavälien ennustamiselle. Diffuusioprosessi itsessään jaetaan adoptioprosessin sekä kulutusprosessin kesken. Adoptioprosessissa populaation jäsenet tekevät yksittäisen ratkaisun innovaation omaksumisesta ja hankkivat ko. tuotteen. Tässä tapauksessa saturaatiotaso on olemassa, joka yleisesti on 100 % populaatiosta. Kulutusprosessi eroaa adoptioprosessista siten, että saturaatiotasoa ei esiinny lainkaan. Uusi tuote hankitaan aina vanhan tilalle, tällainen prosessi on esimerkiksi polyvinyylikloridi PVC:n (Engl. polyvinyl chloride) kulutus Isossa-Britanniassa sekä informaatiojärjestelmien käyttö Yhdysvalloissa. [Arm01]

Diffuusion perusmalli rakentuu ajatukseen, että teknologian yleistyminen noudattaa kuvassa 5.1. esitettyä S-käyrää. Tällöin teknologian yleistyminen on aluksi hyvin hidasta, mutta aikaa myöten nopeutuu, jos diffuusioprosessia ei pystytä pysäyttämään. Lopulta teknologinen diffuusio alkaa lähestyä saturaatiotasoa, jolloin teknologian yleistyminen päättyy lähes täysin. Saturaatiotason saavuttaminen kestää yleensä vuosia, mutta on riippuvainen teknologiasta. Useat teknologian diffuusiomallit perustuvat erilaisten kasvukäyrien hyödyntämiseen. Kasvukäyrissä teknologian yleistyminen perustuu eksponentiaaliseen kasvuun. Kasvukäyrien hyödyntämisen toinen perusoletus on se, että

ennustettavan parametrin tulevaan kehitykseen vaikuttaa parametrin aikaisempi kehitys. Yksi diffuusion perusmalleista on esitetty yhtälössä 1. [Arm01]

$$N(t) = \frac{m}{1 + \alpha e^{-\beta t}} \pm \varepsilon \quad (1)$$

missä

$N(t)$	on tarkasteltavan muuttujan kumulatiivinen suuruus
m	on tarkasteltavan muuttujan maksimiarvo
α	on suhteellisen sijainnin käyrällä määrittävä kerroin, kun $t=0$
β	on diffuusion nopeutta kuvaava kerroin
ε	on virhetermi
t	on aika

Yhtälön 1 avulla voidaan ennustaa teknologian yleistymistä määrittämällä tarkasteltavalle muuttujalle maksimiarvo m , jonka oletetaan yhtälössä 1 pysyvän vakiona. Kerroimet α ja β saadaan määritettyä sovittamalla kasvukäyrä saatavilla olevaan historiadaan esimerkiksi pienimmän neliösumman menetelmällä. [Arm01]

Kirjallisuudessa, joka käsittelee teknologista diffuusiota sekä diffuusiota yleensä painotetaan kuitenkin, ettei yhtä diffuusiomallia ole joka soveltuisi kaikkiin tapauksiin. Tällöin haasteena on ymmärtää analysoitavan teknologian diffuusio niin hyvin, että diffuusioprosessi voidaan mallintaa tarkoituksenmukaista diffuusiomallia hyväksi käyttäen. Kiinnostavaa on se, että yksinkertaisimpien diffuusiomallien on todettu antaneen tarkimmat tulokset. [Arm01]

5.3. Teknologian kustannusten kehittyminen

Mitä enemmän organisaatio tuottaa määrättyä tuotetta sitä nopeammin tuotteen yksikkökustannukset pienenevät. Tätä ilmiötä kutsutaan oppimiskäyräksi. Oppimiskäyrää on käytetty 1930-luvulta asti analysoimaan kustannusten pientymistä tuotettua yksikköä kohden. Aluksi sitä käytettiin lähinnä standardoitujen tuotteiden kustannusten arvioimisessa, mutta nykyään sitä käytetään hyvin yleisellä tasolla kuvaamaan kustannusten kehittymistä. [Ger05]

Oppimiskäyrän käyttöä on dokumentoitu monissa erilaisissa organisaatioissa lentokoneiteollisuudesta kirurgisiin menettelytapoihin asti. Sitä voidaan käyttää myös uuden teknologian kustannusten arvioimiseen. [Ger05]

5.3.1. Oppimiskäyrän yleinen malli

Oppimiskäyrä kuvaa kuinka yksikkökustannukset vähenevät kumulatiivisessa tuotannossa. Kustannusten aleneminen perustuu oppimisen seurauksena tapahtuvaan työn tehokkuuden parantamiseen sekä uusien menetelmien kehittämiseen ja niiden kehittymiseen. Yleinen muoto käyrälle on esitetty yhtälössä 2.

$$C(t_2) = C(t_1) \cdot \left(\frac{q(t_2)}{q(t_1)}\right)^{-b} \quad (2)$$

missä

$C(t)$	on tuotteen keskimääräinen hinta ajan hetkellä t
$q(t)$	on kumulatiivinen tuotanto ajan hetkellä t
b	on oppimiskerroin

Oppimiskäyrä mallinnetaan yleensä tuotannon kumulatiivisen määrän kaksinkertaistuessa tapahtuvan kustannusten pienenemisen avulla. Oppimiskerroin b voidaan laskea tällöin yhtälöstä 3. [Kar05]

$$PR = 2^{-b} \quad (3)$$

missä

PR	on kustannusten kehittymistä kuvaava suhdeluku, kun kumulatiivinen tuotantomäärä kaksinkertaistuu (Engl. Progress ratio).
------	---

Oppimiskerroin on sitä suurempi mitä pienempi on PR . Suuri oppimiskerroin ennustaa nopeaa oppimista ja se johtaa kustannusten nopeaan pienenemiseen. PR on suhdeluku, joten se on aina alle 1. PR -luku voi kuitenkin vaihdella suuresti riippuen tarkasteltavasta tekniikasta. Tyypillisesti PR -luku voi vaihdella 0,7:stä 0,9:iin. [God05]

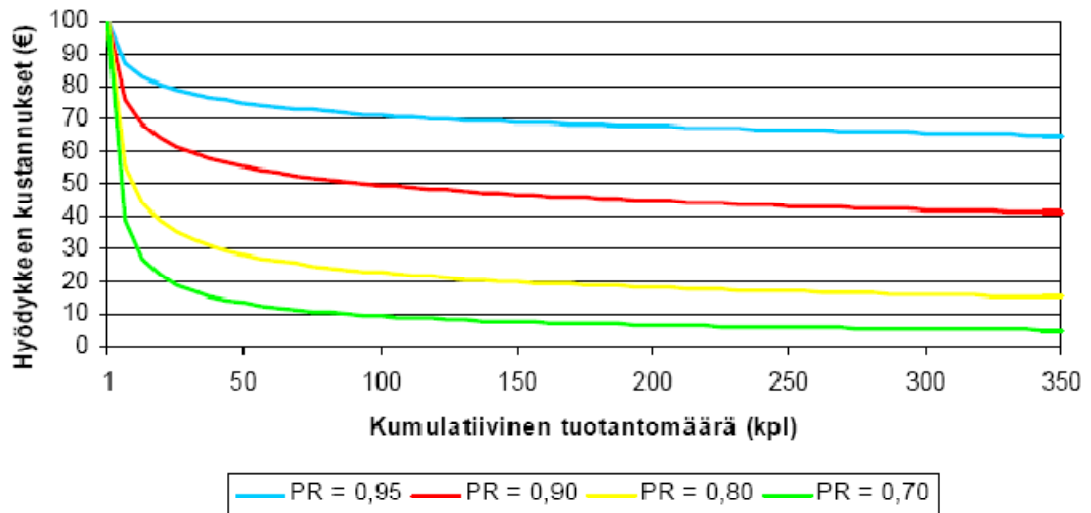
Tuotannon kumulatiivisen määrän kaksinkertaistuessa tuotantokustannukset pienenevät yhtälön 4 mukaisesti. Jos esimerkiksi kustannusten kehittymistä kuvaava suhdeluku on 0,7 niin tuotantokapasiteetin kaksinkertaistuessa tuotantokustannukset pienenevät 30 %.

$$LR = 1 - 2^{-b} = 1 - PR \quad (4)$$

missä

LR	on kustannusten pientymistä kuvaava suhdeluku, kun kumulatiivinen tuotantomäärä kaksinkertaistuu (Engl. Learning rate)
------	--

PR -luku kuvaa melko hyvin sitä, kuinka hyvin tekniikka yleistyy. Mitä halvemmaksi tuotantokustannusten odotetaan kehittyvän ja mitä nopeampaa kehitys on, sitä tehokkaammin tarkasteltavan tekniikan odotetaan yleistyvän. Kuvassa 5.3. esitetään oppimiskäyrän yleinen malli. Kuvassa näkyy eri PR -lukujen vaikutus tuotantokustannuksiin tuotannon alkuvaiheessa.



Kuva 5.3. Eri PR-lukujen vaikutus tuotantokustannuksiin. [Kar05]

Kuvasta 5.3 näkyy hyvin eri PR-lukujen vaikutus hyödykkeen kustannuksiin kumulatiivisessa tuotannossa. Kuvasta käy hyvin ilmi edellä tullut asia: mitä pienempi on PR-luku sitä nopeammin kustannukset laskevat. Kuvan 5.3. käyrä voidaan esittää myös logaritmisien asteikon avulla, jolloin käyrästä tulee laskevia suoria.

Oppimiskäyrän käytössä on muutamia ongelmia sekä selviä rajoituksia. Jos katsoo oppimiskäyrää puhtaasti matemaattisesti, tullaan siihen tulokseen, että käyrä laskee rajattomasti. Toisin sanoen tämä tarkoittaisi sitä, että kustannukset laskisivat lopulta nolleen, kun kumulatiivinen tuotanto jatkaisi kasvua ja PR-luku pysyisi samana. Tämä ei tietenkään pidä paikkansa. Tuotteen kehityksessä onkin nähtävissä muutama eri vaihe, jossa PR-luku vaihtuu. Uuden teknologian kehittämisvaiheessa PR-luku on pieni, mutta tuotteen kaupallistumisen myötä PR-luku kasvaa ja markkinoiden saturoitumisen myötä PR-luku lähenee yhtä. Oppimiskäyrän rakentamisessa ja käytössä tulee muutenkin olla tarkkana. Mallia rakennettaessa tulee huomioida, että valuutta jota käytetään, on sama. Myös inflaation vaikutus tulee ottaa huomioon tai käyrä antaa väärät tulokset. [Ger05]

5.3.2. Aurinkosähkön oppimiskäyrästä

Oppimiskäyriä ja PR-lukuja on laskettu monille eri teknologioille. Tutkimuksissa on todettu, että on olemassa kolmen tyyppisiä teknologioita, joille on tarkasti määritetty PR-luvun vaihteluväli. Suurilla tuotantolaitoksilla, joilla on suuruuden ekonomia etuna, kuten esimerkiksi ydinvoimalalla, PR-luku vaihtelee 0,8 ja 0,9 välillä. Modulaarisilla teknologioilla, joilla on standardoitu massatuotanto, PR-luku vaihtelee 0,7 ja 0,95 välillä. Jatkuva-aikaisilla prosesseilla, joissa yhdistyvät suuruuden ekonomian edut, PR-luku vaihtelee 0,64 ja 0,9 välillä. PV-teknologiat luetaan yleensä modulaarisiin teknologioihin. [Ger05]

Aurinkosähkölle on löydetty luonteenomaisia piirteitä, joista voidaan muodostaa kolme erityyppistä oppimiskäyrää: tyyppi I käyrä vertaa kapasiteetin investointikustan-

nuksia ($\text{€}/W_p$) kumulatiiviseen kapasiteettiin (MW_p), tyypin II käyrä vertaa tuotantokustannuksia ($\text{€}/kWh$) kumulatiiviseen sähkön tuotantoon (TWh) ja tyypin III käyrä vertaa tuotantokustannuksia ($\text{€}/kWh$) kumulatiiviseen kapasiteettiin (MW_p). Kirjallisuudessa tyypin I käyrä on laajimmin käytetty. [Ger05]

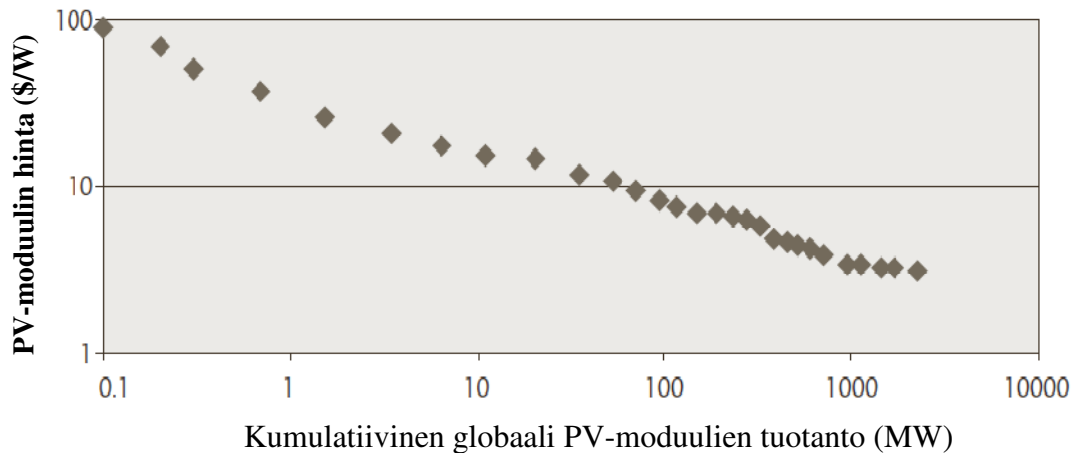
Kirjallisuudesta löytyy useita arvioita aurinkosähköteknologian oppimiskäyrän kehityksestä. Esimerkiksi Beneking esitti omassa arviossaan, että PR-luku ajanjaksolla 1980-2015 olisi 0,8. Eri lähteet antavat erilaisia arvioita, mutta yleisesti PR-luku vaihtelee aikajaksoittain 0,75 yli 0,8:een. Taulukossa 3 on esitetty kirjallisuudesta löytyviä PR-lukuja aurinkosähköstä eri ajanjaksoilla. [Bha09]

Taulukko 3. Kirjallisuudesta löytyviä PR-lukuja aurinkosähkölle.

Julkaisija	PR	Aikajakso
IEA00	0,79	1976-1996
Har00	0,798	1968-1998
Par02	0,772	1981-2000
	0,798	1981-1990
	0,774	1991-2000
Pop03	0,75	1976-2002
	0,805	1989-2002
Sch04	0,80	1976-2001
	0,77	1987-2001
	0,78	1992-2001
	0,81	1992-2001
Ben07	0,80	1980-2015
IEA08	0,82	-

Taulukosta 3 voidaan todeta, että PR-lukujen hajonta on melko suurta. Kaiken kaikkiaan taulukosta löytyvät PR-luvut ovat melko alhaisia ja se ennustaa yleensä sitä, että tekniikka on edelleen kehitysvaiheessa ja tekniikan yleistyminen on vasta edessäpäin. Tämä voidaan huomata jopa tästä taulukosta. Mitä kauemmas historiaan mennään sen alhaisempi on esitetty PR-luku.

PR-lukuja ei kannata laskea maakohtaisesti, vaan on parempi pysyä maailmanlaajuisissa tilastoissa. Maakohtaisissa laskelmissa on ongelmana niiden suuri vaihtelevuus. Maissa, joissa on asennettu keskimääräistä enemmän aurinkosähköä, tulos muodostuu vähemmän suotuisaksi, kuin maissa, joissa on asennettu vähän aurinkosähköä. Tämä johtuu oppimiskäyrän laskentatavasta. Tästä voisi esimerkkinä mainita Saksan, jossa PR-luku oli vuonna 2004 noin 0,9, kun taas muualla maailmassa PR-luku oli 0,75-0,8 [Bha09] Kuvassa 5.4. on esitetty aurinkosähkömoduulien oppimiskäyrä aikavälillä 1968-2002.



Kuva 5.4. Aurinkosähkömoduulien oppimiskäyrä aikavälillä 1968-2002 [IEA03]

Kuvasta 5.4. voidaan hyvin todeta oppimiskäyrän vaikutus tuotetun yksikön hintaan: Mitä suurempi kumulatiivinen tuotanto on sitä pienemmäksi käy yhden tuotetun yksikön hinta. Kuvasta käy hyvin myös ilmi aurinkosähkömoduulien hintakehityksen trendi. Trendi on ollut laskeva aina 60-luvulta asti.

Oppimiskäyrä voidaan mallintaa käyttämällä ns. mustaa laatikkoa, joka voidaan jakaa useisiin osasysteemeihin, joilla on oma oppimiskäyrä sekä PR-luku. Tällaista kutsutaan yhdistelmäjärjestelmäksi (Engl. compound system). Yleensä aurinkosähköjärjestelmistä muodostetaan tällainen yhdistelmäjärjestelmä. Systeemi rakentuu aurinkosähkömoduuleista sekä BOS-järjestelmästä. BOS käsittää aurinkosähköjärjestelmän muut osat, esimerkiksi invertterit ja kaapelit, pois lukien varsinaiset aurinkokennot. BOS-järjestelmän ja varsinaisten kennojen käsittely eroaa muodostettaessa oppimiskäyrää. Suurin ero on se, että aurinkokennot käsitellään globaalisti mutta BOS-järjestelmä paikallisesti. [Ger05]

6. AURINKOVOIMALOIDEN KAUPALLISTUMISEN ENNUSTAMINEN

Aurinkosähkön tuotantokustannukset ovat nykyään vielä monta kertaa suuremmat kuin yleistyneiden sähköntuotantomuotojen tuotantokustannukset. Aurinkosähkön kapasiteetin kasvu on kuitenkin niin valtavaa nykyisin, että on syytä olettaa sen tuotantokustannusten laskevan tulevaisuudessa huomattavasti. Tämän vuoksi onkin mielenkiintoista rakentaa malli aurinkosähkön tuotantokustannusten kehitykselle ja verrata sitä jonkin yleisen sähköntuotantomuodon tuotantokustannusten kehitykseen. Tällä tavalla saadaan haarukoitua tietty vuosikymmen, jolloin nämä kaksi tuotantokustannusta leikkaavat ja saadaan hyvä ennuste aurinkosähkön tuotannon yleistymiselle.

Tässä työssä aurinkosähkön tuotantokustannuksia verrataan hiililauhteen tuotantokustannuksiin, sillä hiililauhde on maailmalla yleisimmin käytetty sähköenergian tuotantomuoto. Lisäksi hiililauhde on jo niin kehittynyttä tekniikkaa, että voidaan perustellusti olettaa, etteivät sen kiinteät kustannukset juuri muutu tulevaisuudessa. Ainoana muuttuvana asiana voidaan hiililauhteen tuotantokustannusten ennustamisessa pitää hiilen hinnan muutoksia tulevaisuudessa. Hiilen hinnalle löytyy eri järjestöjen esittämiä ennusteita, joita tässä työssä hyödynnetään.

Aurinkosähkön osalta kiinnostaa sen kapasiteetin kasvuennusteet. Eri järjestöjen materiaaleista löytyykin runsaasti erilaisia arvioita sen kasvulle. Aurinkosähkön tuotantokustannuksien laskennassa käytetään hyväksi myös oppimiskerrointia. Kirjallisuudesta löytyy aurinkosähkölle monia eri oppimiskertoimia, mutta niissä on kuitenkin havaittavissa yhteneväisyyttä.

Luvun aluksi käydään läpi lyhyesti analyysissä käytetty malli. Tarkempi analyysi varsinaisesta mallista ja sen käytöstä löytyy T. Nevarannan diplomityöstä [Nev06]. Mallin läpikäynnin jälkeen esitellään mallissa käytetyt lähtötiedot hiililauhteen sekä aurinkosähkön osalta. Tämän jälkeen käydään läpi perusanalyysi sekä lisäanalyysi tuotantokustannusten kehitykselle. Perusanalyysissä käytetään lähtötiedoissa annettuja arvoja ja vertaillaan niitä keskenään. Lisäanalyysissä käydään lyhyesti läpi miten oppimiskerros sekä aurinkosähkön kapasiteetti vaikuttaa tuotantokustannusten kehitykseen.

6.1. Ennustuksessa käytetty malli

Työssä käytetty malli perustuu T. Nevarannan diplomityössä luotuun ennakointimenetelmään. [Nev06] Tarkoituksena on Excel-sovelluksen avulla tutkia sähköenergian tuotantokustannusten kehitystä niin aurinkovoimalan kuin hiililauhdevoimalan tapauksessa. Tarkoituksena on hakea tietty ajankohta, jolloin näiden kahden edellä mainitun tekniikan tuotantokustannukset leikkaavat. Käytetyt arvot mallissa perustuvat yleisiin lähtötietoihin sekä ennustuksiin, joita löytyy kirjallisuudesta. Malli on melko yksinkertainen eikä ota huomioon esimerkiksi maakohtaisia eroavaisuuksia lähtötiedoissa. Hiililauhde-

voimala on otettu vertailutekniikaksi, koska hiililauhde on merkittävin sähköntuotantomuoto globaalisti.

Ennustus perustuu tarkasteltavan tekniikan tuotantokustannusten (€/MWh) ja oppimiskäyrän vaikutuksiin. Yhtälöllä 5 voidaan laskea voimalaitoksen sähköenergian tuotantokustannukset. [Tar03] Annuiteettitekijä voidaan laskea liitteestä 2 löytyvän kaavan avulla.

$$C = \frac{aC_1C_{kk}}{t_h} + \frac{H_p}{\eta} \quad (5)$$

missä

C	on tuotantokustannus (€/MWh)
a	on investoinnin annuiteettitekijä
C_1	on investointikustannus (€/MW)
C_{kk}	on käyttö- ja kunnossapitokustannukset (€/MW)
η	on voimalan hyötysuhde
H_p	on polttoaineen hinta (€/MWh)
t_h	on vuotuinen huipunkäyttöaika (h)

Yhtälön 2 avulla on laskettu teknologian kehittymiseen liittyvä tuotantokustannusten pieneneminen oletetusta lähtöarvosta. Yhtälössä 2 tarvittu vakio b on laskettu samassa alaluvussa esiintyvistä yhtälöistä 3. Vakio b tuo malliin mukaan oppimiskertoimen vaikutuksen. Vakiota b muuttamalla voidaan tarkastella PR-lukujen vaikutusta tuotantokustannusten kehitykseen.

6.2. Hiililauhteen lähtötiedot

Hiililauhteen tuotantokustannuksiin vaikuttavat investointikustannukset, käyttö- ja kunnossapitokustannukset, voimalaitoksen taloudellinen käyttöikä, huipunkäyttöaika, hyötysuhde, korkokanta sekä tietysti voimalaitoksen käyttämän polttoaineen hinta. Taulukossa 4 on esitelty hiililauhteen lähtötiedot. Investointi-, käyttö- ja kunnossapitokustannukset sekä hyötysuhde perustuvat Kansainvälisen energiaviraston IEA:n (Engl. International Energy Agency) vuonna 2010 julkaisemaan tutkimukseen. Tiedot ovat vuodelta 2008. Investointikustannuksista on laskettu käyttö- ja kunnossapitokustannukset, sillä niitä ei annettu suoraan julkaisussa. Julkaisussa oli kuitenkin mainittu, että yleensä käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat noin 4 % investointikustannuksista vuodessa. [IEA10b]

Taulukosta löytyy voimalaitokselle myös huipunkäyttöaika. Se kuvaa voimalaitoksen yhden vuoden aikana tuotetun energiamäärän suhdetta sen nimellistehoon. Huipunkäyttöaika vuoden mittaisella tarkasteluajalla voi maksimissaan olla 8760 tuntia. Käytännössä voimalaitosten huipunkäyttöajat jäävät tätä arvoa alhaisemmiksi, johtuen esimerkiksi vuosihuoltoseisokeista. Tässä työssä voimalaitoksen huipunkäyttöajaksi on

valittu 6000 tuntia, sillä voimalaitosten keskimääräinen huipunkäyttöaika on tätä luokkaa. Se on realistinen arvio, eikä luo hiililauhteen tuotantokustannuksista liian optimistista kuvaa.

Investointikustannuksista aiheutuvien pääomakustannusten suuruuteen vaikuttavat voimalan käyttöikä sekä vallitseva korkokanta. Hiililauhdevoimaloiden käyttöikä on keskimäärin noin 30 vuotta. Uusinta teknologiaa hyväksikäyttävien hiililauhdevoimaloiden käyttöikä voi nousta jopa 40 vuoteen, mutta tässä työssä pitäydytään keskimääräisissä arvoissa välttämällä liian optimistisia arvoja. Tuotantokustannukset lasketaan voimalaitosten osalta tyypillisesti 5-10 %:n korkokannalla. Tässä työssä käytettäväksi korkokannaksi on valittu 5 %. [IEA05]

Taulukko 4. Hiililauhdevoimalaitosten sähkön tuotantokustannusten laskennassa käytetyt lähtötiedot. [IEA05, IEA10b]

Hiililauhde	
Investointikustannukset (€/kW)	1430
Vuotuiset käyttö- ja kunnossapitokustannukset (€/kW)	57
Taloudellinen elinikä (v)	30
Huipunkäyttöaika (h)	6000
Hyötysuhde (%)	40
Korkokanta (%)	5
Polttoaineen hinta (€/MWh)	8

Käytettävän polttoaineen lähtöhinnaksi on valittu 8 €/MWh. Tämä hinta on 2000-luvun keskimääräinen hinta hiilelle. 2000-luvun loppupuolella hiilen hinta nousi huomattavasti taloudellisen taantuman takia, mutta on nyt palautunut normaaliksi. Hinta jäi tosin aiempaa korkeammalle tasolle. Hiilen hinnan kehitykselle on esitetty kaksi ennustetta taulukossa 5, jotta voidaan laskea hiililauhteelle tuotantokustannukset myös tulevaisuudessa.

Taulukko 5. Hiilen hinnan vuosittaisen kasvuprosentin ennusteet kolmessa eri tapauksessa. [IEA10, EPIA10]

Hiilen hintaennusteet			
	Minimi	Referenssi	Korkea
IEA	-0,8 %	1,9 %	3,3 %
EPIA	0,4 %	2,0 %	3,6 %

Taulukko 5 esittää hiilen hinnan kumulatiivisen kasvun prosentteina. Laskennan helpottamiseksi ei ennusteessa oteta huomioon väliaikaisia hinnan vaihteluita, joita molemmissa ennusteissa löytyy, vaan pitäydytään keskimääräisessä muutoksessa. IEA:n ennuste on esitetty öljylle, mutta hiilen hinta seuraa melko tarkasti öljyn hintaa. Tästä

syystä on järkevä olettaa myös hiilen hinnan kehittyvän pitkällä aikavälillä likimain öljyn hinnan mukaisesti. Euroopan aurinkosähköteollisuuden järjestö EPIA:n (Engl European Photovoltaic Industry Association) ennusteessa on annettu vain minimi- ja maksimi-arvot hinnan kehitykselle. Referenssiarvon on arvioitu olevan näiden kahden puolivälissä.

Taulukoiden 4 ja 5 lähtötietojen tarkastelussa on hyvä huomioda se, että ne pyrkivät kuvaamaan keskimääräisiä arvoja. Yksittäisten voimalaitosten arvot voivat todellisuudessa vaihdella hyvin paljon. Taulukoissa esiintyvät arvot eivät todellisuudessa ole riippumattomia keskenään, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi tässä työssä oletetaan, ettei riippuvuussuhteita esiinny.

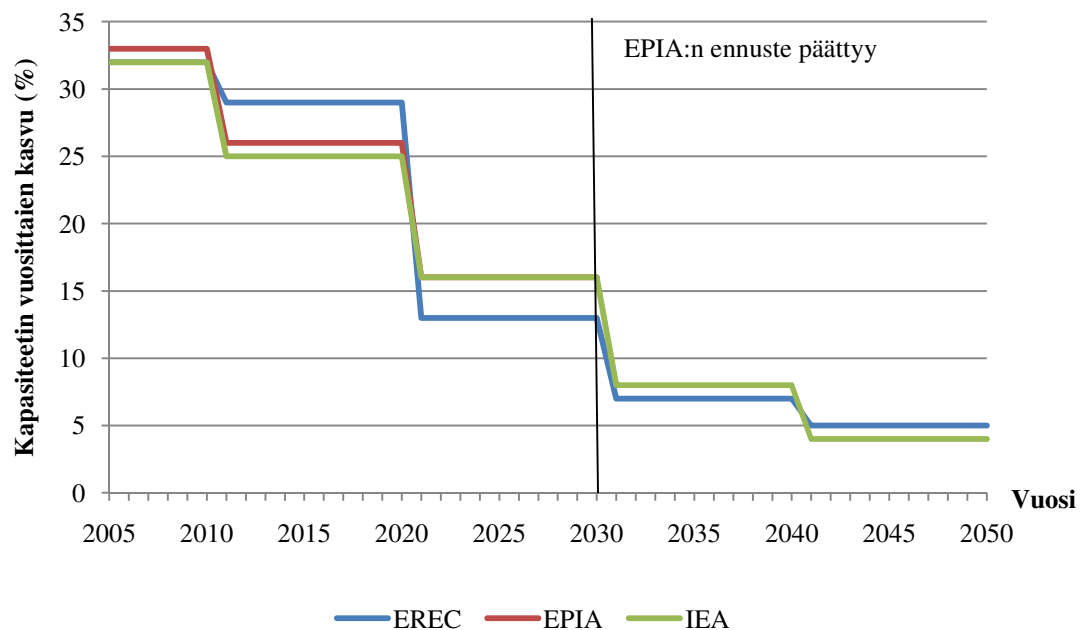
6.3. Aurinkosähkön lähtötiedot

Aurinkosähkön tuotantokustannukset lasketaan mallissa eri tavalla kuin hiililauhteen tuotantokustannukset. Hiililauhteen tuotantokustannusten laskennassa käytetään yhtälöä 5, kun taas aurinkosähkön tuotantokustannusten laskennassa käytetään yhtälöä 2. Tarkoituksena on hakea kirjallisuudesta aurinkosähkölle tuotantokustannus nykyhetkestä. Sen avulla lasketaan tulevien vuosien kustannukset käyttämällä hyväksi oppimiskertoimen vaikutusta. Aurinkosähkön tulevien tuotantokustannusten laskentaa varten tarvitaan PR-luku, nykyinen tuotantokustannus sekä ennusteet aurinkosähkön kapasiteetin kasvulle.

Kirjallisuudesta löytyy aurinkosähköteknologialle joitakin eri arvoja PR-luvulle. Yleensä ne sijoittuvat lähelle 0,8:aa. Luvussa 5 on käsitelty tarkemmin PR-lukua. Aurinkosähkön tapauksessa voidaan todeta PR-luvun alhaisuudesta, että tekniikka on vielä selvästi kehittymässä. Työssä käytettäväksi PR-luvuksi on valittu 0,82. Tähän lukuun päädyttiin sen vuoksi, ettei aurinkosähkön tapauksessakaan olla liian optimistisia. Tuo luku kuvaa hyvin aurinkosähkön oppimiskerrointa tällä hetkellä. [IEA08]

Aurinkosähkön tuotantokustannukset ovat olleet laskussa 1990-luvulta asti. Vuonna 1990 aurinkosähkön tuotantokustannukset olivat noin 550-1100 €/MWh. Tuosta ne ovat laskeneet huomattavasti ja nykyisin aurinkosähkön tuotantokustannukset ovatkin noin 220-440 €/MWh. Tuotantokustannusten on ennustettu laskevan vielä tämän hetkisestä arvosta huomattavasti. Aurinkoisilla alueilla etelässä auringon säteilyä on riittävästi ympäri vuoden joten tuotantokustannuksetkin ovat pohjoisia alueita matalammat. Tästä syystä tuotantokustannuksissa on suuria eroja. Työssä on analysoitu sekä etelän että pohjoisen tuotantokustannusten kehitystä, joten analyysissä on käytetty tuotantokustannusten osalta arvoja 220 €/MWh ja 440 €/MWh. [EREC08]

Aurinkosähkön kapasiteetin kasvulle löytyy useita eri ennusteita. Ne kuitenkin ovat melko lähellä toisiaan, joten tässä työssä on esitelty vain kolmen eri järjestön ennusteet. Aikaisemmat ennusteet aurinkosähkön kapasiteetin kasvulle ovat pitäneet melko hyvin paikkansa, joten on syytä olettaa, että myös tulevaisuuteen menevät ennusteet ovat riittävissä määrin oikein. Kuvassa 6.1. on esitetty IEA:n, EREC:n sekä EPIA:n ennusteet aurinkosähkön kapasiteetin kasvulle. EPIA:n ennuste päättyy vuoteen 2030.



Kuva 6.1. Aurinkosähkön vuosittainen kapasiteetin kasvu vuoteen 2050 asti. EPIA:n ennuste päättyy vuoteen 2030. [EREC08a, EPIA08, IEA10a]

Kuvassa 6.1. on esitetty aurinkosähkön kumulatiivinen kasvu prosentteina. Kuvasta nähdään, että eri järjestöjen tutkimukset antavat aurinkosähkön kasvulle samankaltaiset ennusteet. Vuosittainen kasvu on huimaa vielä parikymmentä vuotta jonka jälkeen kasvuvauhti hidastuu selvästi. Analyysissä on käytetty ainoastaan Euroopan uusiutuvan energia järjestö EREC:n (Engl. European Renewable Energy Council) sekä IEA:n ennustuksia. EPIA:n ennustusta ei käytetty sen vuoksi, että se loppuu jo vuodelle 2030.

6.4. Aurinkosähkön kilpailukyvyn määrittäminen

Työssä vertaillaan sähkön tuotantokustannuksia aurinkosähkön sekä hiililauhteen tapauksessa. Menetelmän avulla voidaan analysoida näiden kahden tuotantomuodon suhteellista kilpailukykyä sekä tuotantokustannusten riippuvuutta eri tekijöiden suhteen. Tarkasteltava ajanjakso sijoittuu vuosien 2006 ja 2050 välille.

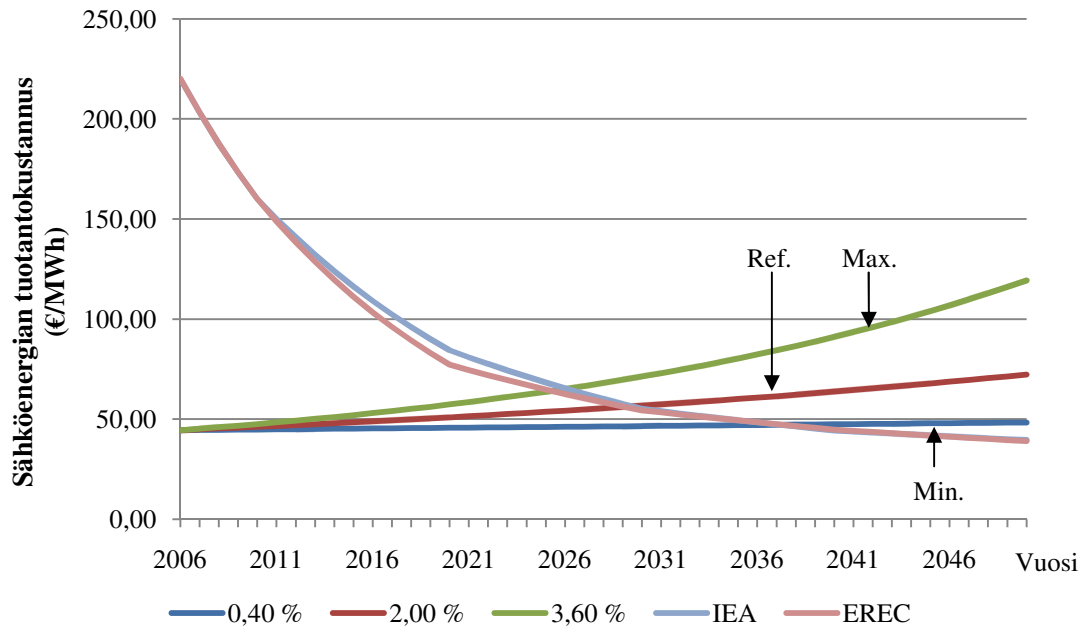
Hiililauhteen tuotantokustannukset lasketaan annuiteettimenetelmällä, yhtälön 5 avulla. Hiililauhteen tuotantokustannusten kehittymiseen vaikuttaa pääasiassa polttoaineen hinnan kehitys tulevaisuudessa. Hinnan kehitykselle on esitetty taulukossa 5 kahden eri järjestön esittämät ennusteet hiilen hinnan muutokselle. Yhtälössä 5 on myös muita muuttujia, esimerkiksi investointikustannukset sekä käyttö- ja kunnossapitokustannukset, mutta on järkevää olettaa ettei niissä tapahdu suuria muutoksia tulevaisuudessa. Tämä oletus perustuu siihen, että hiililauhdetekniikka on jo niin pitkälle kehittyntä, etteivät kustannukset muutu radikaalisti tulevaisuudessa eivätkä näin ollen vaikuta ennusteeseen.

Aurinkosähkön tuotantokustannus pienenee oppimiskäyrän mukaisesti tekniikan kumulatiivisen tuotantokapasiteetin kasvaessa. Lähtötasona käytetään vuoden 2006 tuotantokapasiteettia sekä sähkön tuotantokustannuksia. Näiden lähtötietojen avulla laskeaan yhtälöä 2 hyväksi käyttäen aurinkosähkön tuotantokustannusten kehitys vuoteen 2050 asti. Laskennassa tarvitaan lisäksi kuvassa 6.1. esitettyjä ennusteita aurinkosähkön kapasiteetin kasvusta.

Analyysissä käytetään kahden eri järjestön esittämiä ennusteita hiilen hinnan kehitykselle sekä kahden eri järjestön esittämiä ennusteita aurinkosähkön kapasiteetin kasvulle. Nämä löytyvät taulukosta 5 sekä kuvasta 6.1. Aurinkosähkön tuotantokustannusten lähtötasolle on esitetty kaksi eri hintaa. Hintojen vaikutusta analysoidaan myös lähemmin. Muut lähtötiedot pidetään perusanalyysissä vakioina.

6.4.1. Perusanalyysi

Perusanalyysissä on käytetty edellä mainittuja arvoja, jotka löytyvät taulukoista 4 ja 5 sekä kuvasta 6.1. Aurinkosähkön tuotantokustannusten lähtöarvona on käytetty ensiksi 220 €/MWh ja tämän jälkeen on tehty analyysi siitä, mitä tapahtuu, jos aurinkosähkön tuotantokustannusten lähtöarvoksi muutetaan 440 €/MWh. Analyysin helpottamiseksi IEA:n ja EREC:n aurinkosähkölle laatimat kasvuennusteet ovat piirretty samaan kuvaan, sillä niiden eroavuudet ovat hyvin pieniä. Kuvaan on piirretty myös kolme hiilen hintaennusteen mukaista hiililauhteen tuotantokustannuskäyrää: minimihintaennuste, referenssihintannuste sekä maksimihintaennuste. Kuvassa 6.2. on esitetty EPIAN:n ennusteeseen nojaava hiililauhdetuotannon kustannusten muutos hiilen eri hintaennusteilla sekä aurinkosähkön tuotantokustannusten kehitys kahden eri ennusteen mukaan.



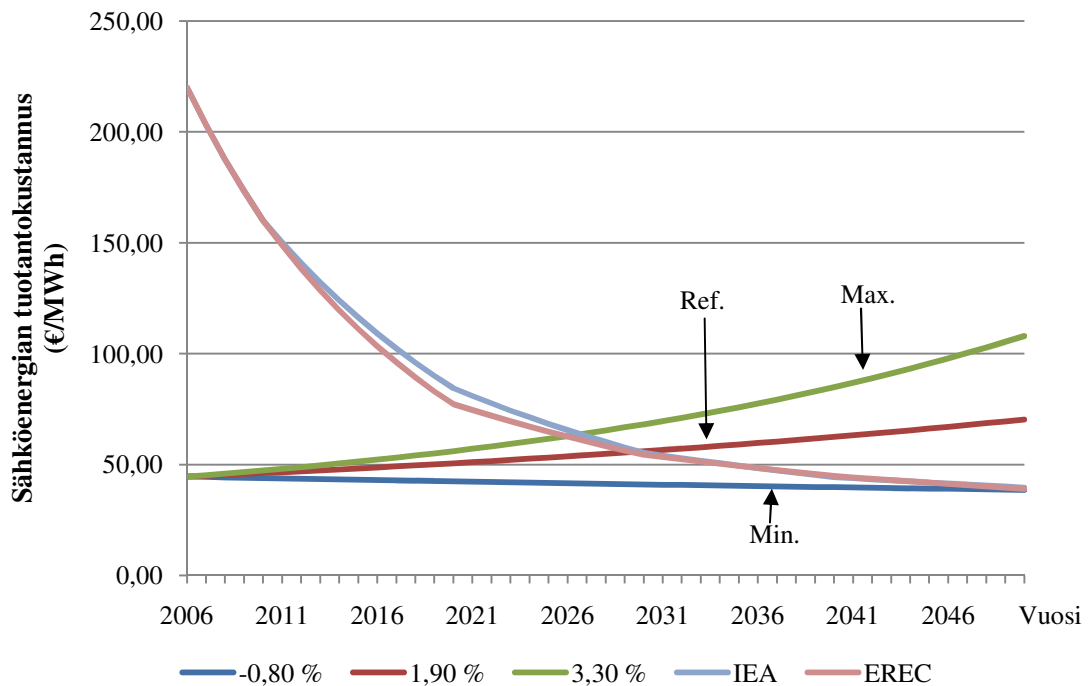
Kuva 6.2. Sähköenergian tuotantokustannusten kehitys vuodesta 2006 vuoteen 2050. Kuvassa on esitetty EPIA:n ennusteet hiilen hinnan kehitykselle kolmessa eri tapauksessa sekä aurinkosähkön tuotantokustannusten ennuste EREC:n ja IEA:n laatimien kapasiteetin kasvuennusteiden mukaan. Aurinkosähkön tuotantokustannusten lähtötaso on 220 €/MWh. [EPIA10, EREC08a, IEA10a]

Kuvasta 6.2. huomataan hyvin, että IEA:n ja EREC:n ennusteet aurinkosähkön tuotantokustannusten osalta ovat hyvin samanlaiset. Suurin eroavaisuus osuu lähitulevaisuuteen, mutta sekin on hyvin minimaalinen ja tasoittuu lähestyttäessä vuotta 2030, jonka jälkeen tuotantokustannuksissa ei juuri ole eroa. Pienet erot selittyvät aurinkosähkökapasiteetin kasvuennusteiden eroilla. Aurinkosähkön tuotantokustannukset pienenevät vuosi vuodelta. Vuoteen 2025 asti tuotantokustannukset pienenevät yli 6 % vuodessa, jonka jälkeen kustannusten lasku tasoittuu. Hiilen hintaennusteet poikkeavat toisistaan melko paljon. Prosentuaalisesti hiilen hintojen kasvuennusteet ovat melko pieniä, mutta kertautuessaan joka vuosi tuotantokustannusten erot kasvavat selvästi eri hintaennusteille. Hiililauhteen tuotantokustannusten nousu ei kuitenkaan ole niin nopeaa kuin aurinkosähkön tuotantokustannusten lasku. Näiden kahden sähköntuotantomuodon tuotantokustannukset leikkaavat tulevaisuudessa.

Kuvasta 6.2. voidaan tarkastella hiililauhteen tuotantokustannusten vaikutusta sähköenergian tuotannon kannattavuuteen. Kuvasta käy selvästi ilmi, että ennen vuotta 2015 aurinkosähkön tuotantokustannukset ovat paljon suuremmat kuin hiililauhteen tuotantokustannukset. Ero kuitenkin alkaa pienentyä lähestyttäessä vuotta 2020 ja vuoden 2026 paikkeilla aurinkosähkön ja hiililauhteen tuotantokustannukset kohtaavat hiilen maksimihintaennusteessa. Hiilen hintaennuste vaikuttaa paljon näiden kahden tekniikan tuotantokustannuksiin, sillä minimihintaennusteessa tuotantokustannukset leikkaavat vasta vuoden 2036 paikkeilla. Eroa näillä kahdella ennusteella on jopa kymme-

nen vuotta. Todennäköinen tuotantokustannusten kohtaaminen tapahtuu kuitenkin referenssihintaennusteen mukaan vuoden 2030 paikkeilla.

Kuvassa 6.3. on esitetty IEA:n laatima ennuste hiilen hinnan kehitykselle. Kuvassa on samat IEA:n ja EREC:n ennusteet aurinkosähkön tuotantokustannuksille kuin kuvassa 6.2. Lähtöarvot pysyvät muuten samoina kuin kuvan 6.2. tapauksessa, vain hiilen hinnan kehitys minimi-, referenssi- ja maksimitapauksissa on muuttunut.

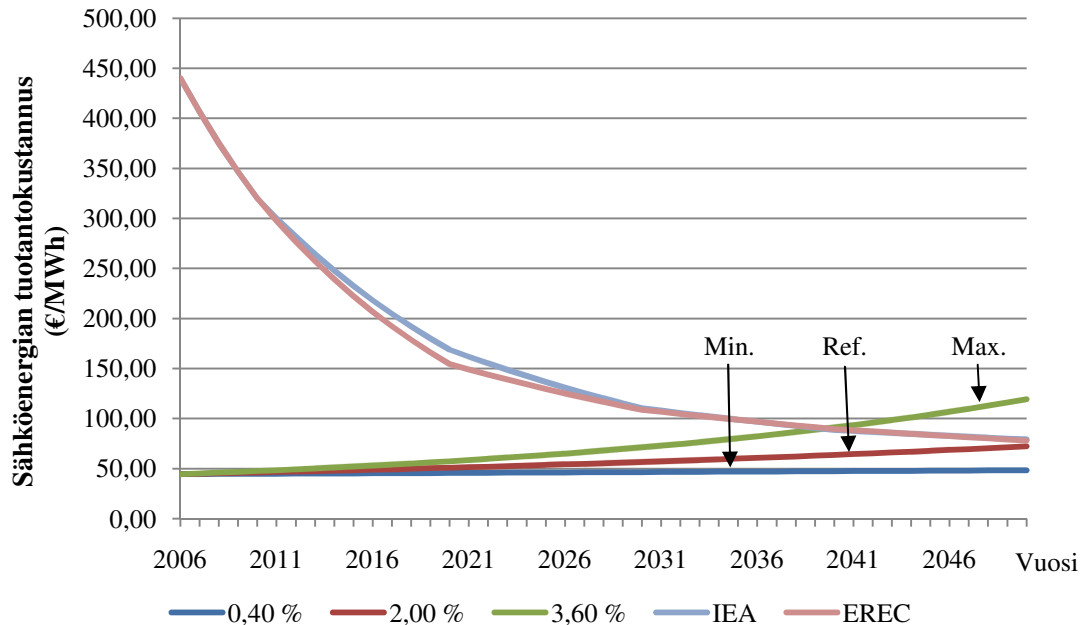


Kuva 6.3. Sähköenergian tuotantokustannusten kehitys vuodesta 2006 vuoteen 2050. Kuvassa on esitetty IEA:n ennusteet hiilen hinnan kehitykselle kolmessa eri tapauksessa sekä aurinkosähkön tuotantokustannusten ennuste EREC:n ja IEA:n laatimien kapasiteetin kasvuennusteiden mukaan. Aurinkosähkön tuotantokustannusten lähtötaso on 220 €/MWh. [IEA10, EREC08a, IEA10a]

Kuvasta 6.3. huomataan, että se vastaa melko hyvin kuvaa 6.2. Ainoa eroavaisuus löytyy oikeastaan hiilen minimihintaennusteen aiheuttamasta hiililauhteen tuotantokustannusten hienoisesta laskusta. Aurinkosähkön ennuste on sama kuin kuvassa 6.2., joten sen suhteen analyysi ei ole muuttunut. Tuotantokäyrät leikkaavat melko samassa kohtaa hiilen maksimi- ja referenssiennusteissa kuin kuvassa 6.2. Minimihintaennuste kuitenkin laskee hiilen hintaa 0,8 % vuodessa. Lasku on hienoinen, mutta se vaikuttaa kuitenkin niin paljon, että aurinkosähkön tuotantokustannusten leikkautuminen hiililauhteen tuotantokustannusten ennusteen kanssa muuttuu huomattavasti verrattuna kuvan 6.2. tilanteesta. Kuvan 6.3. tilanteessa tuotantokustannukset kohtaavat vasta vuoden 2050 paikkeilla. Tästä voidaan päätellä se, että jos hiilen hinta jostain syystä romahtaa täysin ja hiililauhteen tuotantokustannukset laskevat tulevaisuudessa enemmän kuin 1 % vuo-

nessa, niin aurinkosähkön mittava tuotanto ei kannata vielä moneen vuosikymmeneen suurempien tuotantokustannusten vuoksi.

Kuva 6.4. on samoilla tiedoilla tehty kuin kuva 6.2. Ainoa ero on se, että aurinkosähkön tuotantokustannusten lähtötaso on tässä kuvassa 440 €/MWh. Tämä on nykyisin tyypillinen aurinkosähkön tuotantokustannusten arvo pohjoisessa, jossa auringon säteilyä ei ole saatavilla läheskään yhtä paljon kuin eteläisemmissä maissa.



Kuva 6.4. Sähköenergian tuotantokustannusten kehitys vuodesta 2006 vuoteen 2050. Kuvassa on esitetty EPIA:n ennusteet hiilen hinnan kehitykselle kolmessa eri tapauksessa sekä aurinkosähkön tuotantokustannusten ennuste EREC:n ja IEA:n laatimien kapasiteetin kasvuennusteiden mukaan. Aurinkosähkön tuotantokustannuksen lähtötaso on 440 €/MWh [EPIA10, EREC08a, IEA10a]

Kuvasta 6.4. voidaan hyvin todeta, kuinka suuri merkitys on aurinkosähkön tuotantokustannusten lähtötasolla. Hiililauhteen tuotantokustannusten kehitys on sama kuin kuvassa 6.2., mutta aurinkosähkön tuotantokustannusten kaksinkertaistuessa tuotantokustannukset kohtaavat ainoastaan hiilen maksimihintaennusteen kanssa vuoden 2040 paikkeilla. Eroa kuvan 6.2. kanssa on lähes 15 vuotta. Hiilen referenssi- sekä minimihintaennusteen tapauksessa tuotantokustannukset eivät kohtaa tässä ennusteessa lainkaan. Pohjoisilla alueilla aurinkosähkön tuotannon kannattamattomuus verrattuna hiililauhteeseen käy vielä selvemmin ilmi jos tuotantokustannusten kehitystä analysoidaan IEA:n laatiman ennusteen pohjalta. Hiililauhteen tuotantokustannukset käyttäytyvät kuvan 6.3. mukaan, jolloin minimihintaennusteeseen perustuva hiililauhteen tuotantokustannus laskee. Hiililauhteen tuotantokustannusten lasku aiheuttaa sen, että aurinkosähkön tuotantokustannukset eivät ole lähelläkään hiililauhteen tuotantokustannuksia ennusteessa eikä näin ollen voida edes arvioida tarkasti milloin tuotantokustannukset kohtaavat.

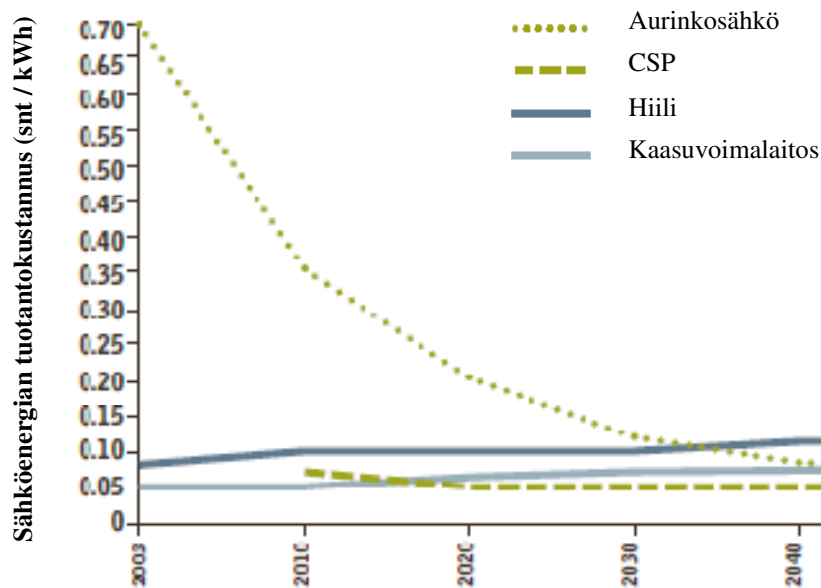
Kuvissa 6.2 ja 6.3 on esitetty kaksi eri ennustetta aurinkosähkön tuotantokustannuksille sekä kahden eri järjestön ennusteet hiilen hinnalle kolmessa eri tapauksessa. Taulukkoon 6 on koottu vertailun helpottamiseksi vuodet, jolloin odotetaan aurinkosähkön ja hiililauhteen tuotantokustannusten olevan samalla tasolla. Kuvan 6.4 tietoja ei ole taulukkoon lisätty, sillä kuva on osittain puutteellinen. Ennusteen mukaan aurinkosähkön tuotantokustannukset saavuttavat hiililauhteen tuotantokustannukset hiilen referenssi- ja minimihintaennusteiden kanssa vasta vuoden 2050 jälkeisenä aikana. Ennusteita ei ole mielekästä ulottaa tätä vuotta kauemmiksi, sillä voidaan olettaa, että ennusteiden tarkkuus kärsii liiaksi jos mennään tulevaisuudessa yli 40 vuotta eteenpäin.

Taulukko 6. Hiililauhteen ja aurinkosähkön tuotantokustannusten leikkausvuodet hiilen eri hintaennusteiden mukaan jaoteltuna.

Hiililauhteen ja aurinkosähkön tuotantokustannusten leikkausvuodet						
PV \ Hiili	EPIA			IEA		
	Min.	Ref.	Max.	Min.	Ref.	Max.
EREC	2037	2029	2025	2051	2029	2026
IEA	2037	2029	2026	2051	2029	2026

Taulukosta 6 voidaan huomata, että ennusteiden erot ovat hyvin vähäiset kun tarkastellaan EPIA:n ja IEA:n hiilen hintaennusteisiin perustuvia tuotantokustannuksia erikseen. Aurinkosähkön tuotantokustannusten ennusteet eivät paljoa muutu käytettiin sitten EREC:n tai IEA:n ennustetta. Eroa on vain ennusteissa maksimihintaennusteen osalla ja siinäkin vain vuoden verran. Toisaalta jos tarkastellaan EPIA:n ja IEA:n hiilen hintaennusteisiin perustuvia vuosia huomataan, että näiden osalla ainoa ero löytyy hiilen minimihintaennusteesta. Hiilen referenssi- ja maksimihintaennusteisiin perustuvat tuotantokustannukset leikkaavat aurinkosähkön tuotantokustannukset samaan aikaan kuin EPIA:n ennusteessa. IEA:n minimihintaennusteen huomattava ero selittyy sillä, että tässä ennusteessa hiilen hinta laski hienoisesti vuosittain.

Julkaisuissa on ollut mainintoja aurinkosähkön tuotantokustannusten laskusta hiililauhteen tuotantokustannusten tasalle. Erilaisia kaavioita ja taulukoita on julkaistu. Nämä julkaisut ovat yleensä ympäristöjärjestöjen tekemiä, joten niihin kannattaa suhtautua varauksella. Kuvassa 6.5. on esitetty aurinkosähkön ja hiililauhteen kustannusten kehitys vuodesta 2003 vuoteen 2050. Kuvassa on esitetty myös kaasuvoimalaitosten sekä keskittävän aurinkovoiman eli CSP:n (Engl. Concentrated solar power) kustannusten kehitys.



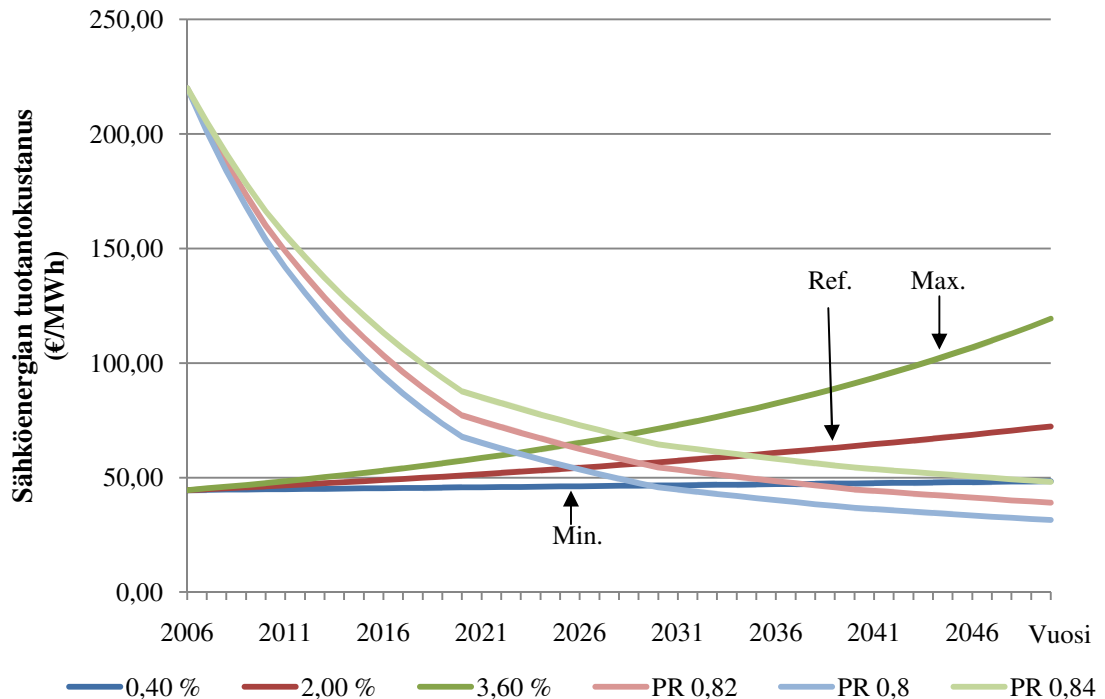
Kuva 6.5. Aurinkosähkön ja hiililauhteen kustannusten kehitys vuodesta 2003 vuoteen 2050. [EREC07a]

Kuvasta 6.5. voidaan todeta, että EREC:n ennusteen mukaan aurinkosähkön ja hiililauhteen tuotantokustannukset leikkaavat vuoden 2035 paikkeilla. Tämä on melko lähellä tässä työssä saatua tulosta. Lähtöarvoissa ja laskentatavassa on varmastikin eroavaisuuksia, mutta ne ovat yleisesti ottaen yhtenevät. Tästä voidaan päätellä, että tässä työssä saatuihin tuloksiin voidaan luottaa.

6.4.2. Lisäanalyysi

Perusanalyysissä vertailtiin aurinkosähkön sekä hiililauhteen tuotantokustannusten kehitystä eri ennusteiden pohjalta. Lisäksi käytiin läpi miten ennusteet muuttuvat kun aurinkosähkön tuotantokustannusten nykytasoa nostettiin kaksinkertaiseksi. Lisäanalyysissä käydään lisäksi läpi, miten PR-luku vaikuttaa aurinkosähkön tuotantokustannusten kehitykseen sekä se, miten olemassa olevan kapasiteetin kehitys vaikuttaa aurinkosähkön tuotantokustannusten kehitykseen. Lisäanalyysissä käytetään EPIA:n ennustetta hiilen hintakehitykselle ja EREC:N ennustetta aurinkosähkön kapasiteetin kasvulle. IEA:n ennuste aurinkosähkölle jätettiin pois, koska se ei paljoa poikkea EREC:n ennusteesta eikä anna lisäarvoa analyysille. EPIA:n ennuste hiililauhteelle valittiin sen vuoksi, koska ennusteessa myös minimihintaennuste kasvoi vuosittain toisin kuin IEA:n ennusteessa.

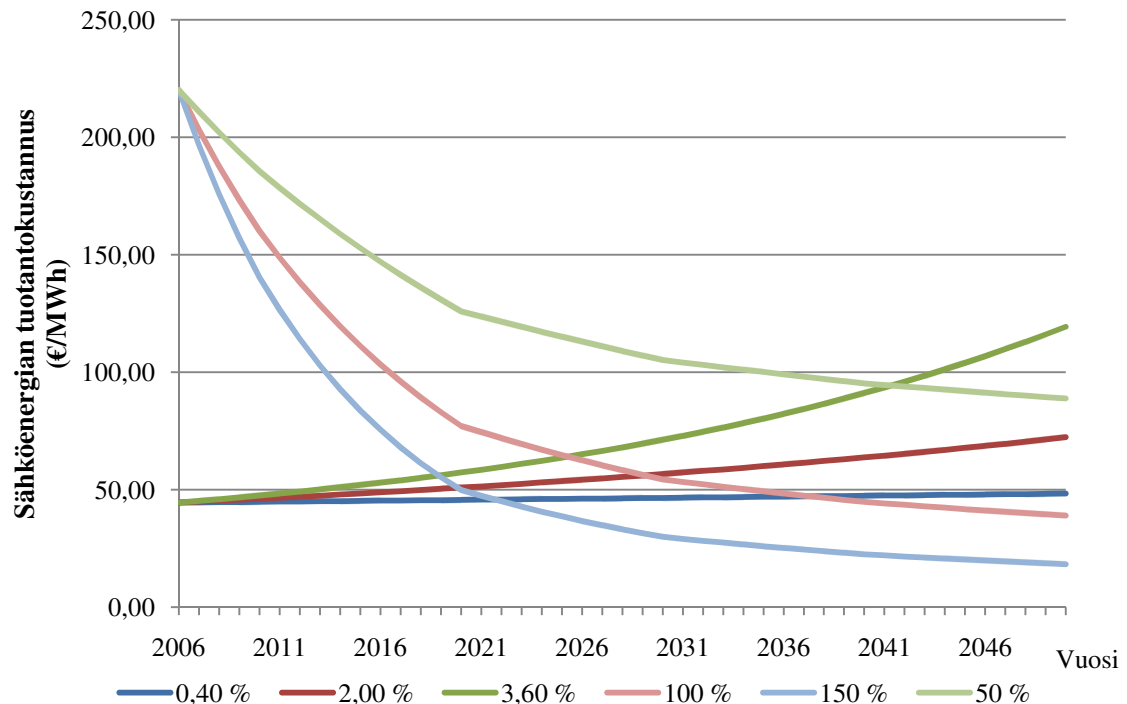
Aluksi vertaillaan oppimiskertoimen vaikutusta aurinkosähkön tuotantokustannusten kehitykseen. Perusanalyysissä käytetty PR-luku pidettiin referenssiarvona. Perusanalyysin PR-luku on 0,82, joka on kuvaan piirretty punaisella. PR-lukua pienennettiin ja kasvatettiin kahdella prosenttiyksiköllä, jolloin kahdeksi muuksi PR-luvuksi muodostui 0,8 ja 0,84. Kuvassa 6.6. on esitetty PR-luvun vaikutus kolmessa eri tapauksessa.



Kuva 6.6. Sähköenergian tuotantokustannusten kehitys vuodesta 2006 vuoteen 2050. Kuvassa on esitetty EPIA:n ennusteet hiilen hinnan kehitykselle kolmessa eri tapauksessa sekä aurinkosähkön tuotantokustannusten ennuste EREC:n laatiman kapasiteetin kasvuennusteen mukaan. Aurinkosähkön tuotantokustannusten lähtötaso on 220 €/MWh. [EPIA10, EREC08a]

Kuvasta 6.6. voidaan hyvin todeta oppimiskertoimen vaikutus aurinkosähkön tuotantokustannuksiin. Mitä pienempi on PR-luku sitä nopeammin aurinkosähkön tuotantokustannukset laskevat. Oppimiskerroin onkin sitä suurempi mitä pienempi on PR-luku. Suuri oppimiskerroin ennustaa nopeaa oppimista ja se puolestaan johtaa kustannusten nopeaan pienenemiseen. Tämä käy hyvin yksiin luvussa 5.3.1. läpikäytyyn oppimiskertoimen vaikutukseen kustannusten kehityksessä. Kuvan 6.6. tilanne todistaa tämän toteutumisen. Kuvassa aurinkosähkön tuotantokustannukset kohtaavat hiililauhteen tuotantokustannukset eri vuosina riippuen käytetystä PR-luvusta. Esimerkiksi hiilen hinnan referenssiennusteessa PR-luvulla 0,8 tuotantokustannukset kohtaavat vuoden 2026 paikkeilla kun taas PR-luvulla 0,84 tuotantokustannukset kohtaavat vuoden 2035 paikkeilla. Eroa näissä kahdessa tapauksessa on lähes 10 vuotta.

Kuvassa 6.7. on tutkittu aurinkosähkön kapasiteetin vaikutusta sen tuotantokustannuksiin. Kuvaan on piirretty punaisella perusanalyysissä käytetyn aurinkosähkökapasiteetin tuotantokustannukset. Kuvassa on lisäksi myös kaksi muuta tuotantokustannuskäyrää aurinkosähkölle. Ajatuksena oli mallintaa miten aurinkosähkön tuotantokustannukset muuttuvat jos perusanalyysissä käytetty aurinkosähkön kapasiteetin ennuste ei pidä paikkaansa. Perusanalyysin kapasiteettia on pienenetty ja kasvatettu 50 %. Tämä antaa hyvän kuvan mitä aurinkosähkön tuotantokustannuksille tapahtuu jos perusanalyysissä käytetty kapasiteetin ennuste on liian pieni tai liian suuri.



Kuva 6.7. Sähköenergian tuotantokustannusten kehitys vuodesta 2006 vuoteen 2050. Kuvassa on esitetty EPIA:n ennusteet hiilen hinnan kehitykselle kolmessa eri tapauksessa sekä aurinkosähkön tuotantokustannusten ennuste EREC:n laatiman kapasiteetin kasvuennusteen mukaan. Aurinkosähkön tuotantokustannusten lähtötaso on 220 €/MWh. [EPIA10, EREC08a]

Kuvasta 6.7. huomataan hyvin kuinka suuri merkitys on aurinkosähkön kapasiteetin kasvulla sen tuotantokustannuksiin. Mitä nopeammin kapasiteetti kasvaa sen nopeammin tuotantokustannukset pienenevät. Tämä itse asiassa korreloi PR-luvun kanssa, sillä oppimiskäyrän suuruus kuvaa melko hyvin sitä, kuinka hyvin tekniikka yleistyy. Mitä halvemaksi tuotantokustannusten odotetaan kehittyvän ja mitä nopeampaa kehitys on, sitä tehokkaammin tarkasteltavan tekniikan odotetaan yleistyvän. Sitä vastoin, jos kapasiteetti kasvaa hyvin hitaasti se johtaa siihen, ettei tekniikkaa kehitetä eikä näin ollen tuotantokustannusten odoteta laskevan kovinkaan nopeasti.

6.4.3. Johtopäätökset

Kuvista 6.2-6.7 löydetään paljon yhtäläisyyksiä mutta myös eroja. Aurinkosähkön tämän hetkiset tuotantokustannukset ovat korkeat verrattuna hiililauhteen tuotantokustannuksiin. Tämä selittää sen, että aurinkosähköllä ei vielä nykyään ole suurta markkinaosuutta. Tilanne on kuitenkin muuttumassa, sillä aurinkosähkön kapasiteetin kasvuprosentti tällä hetkellä on hyvin suuri eikä muutosta ole havaittavissa. Ennusteet sen kasvulle ovat hyvin suotuisat myös tulevana vuosikymmeninä. Tämä valtava kapasiteetin kasvu vaikuttaa luonnollisesti aurinkosähkön tuotantokustannuksiin. Tuotantokustannukset laskevat vauhdilla lähes vuoteen 2030 asti. Tuotantokustannusten huomattava lasku edistää aurinkosähkön käyttöönottoa ja se puolestaan kasvattaa olemassa olevaa kapasiteettia. Positiivinen kierre on valmis ja vain voimistuu tulevaisuudessa.

Hiilen hinnan nousu toisaalta kasvattaa hiililauhteen tuotantokustannuksia. Tämä tuotantokustannusten nousu edistää aurinkosähkön ja hiililauhteen tuotantokustannusten kohtaamista. Tämän hetkisen ennusteen mukaan on järkevä olettaa, että tuotantokustannukset kohtaisivat vuoden 2030 paikkeilla. Tämä kuitenkin on ennuste ja se voi muuttua jos olosuhteet muuttuvat. Hiilen hinta vaikuttaa pääasiassa siihen, milloin tuotantokustannukset kohtaavat. Tässä työssä käytettiin maltillisia hintaennusteita. Jos hiilen hinta nousee kuitenkin ennustettua nopeampaa, niin on selvää, että aurinkosähkön ja hiililauhteen tuotantokustannukset leikkaavat ennustettua aikaisemmin. Toisaalta, jos hiilen hinta laskee tulevaisuudessa, niin hiililauhteen tuotantokustannuksetkin laskevat. Tämä johtaa siihen, että aurinkosähkön ja hiililauhteen tuotantokustannusten kohtaaminen voi siirtyä vuosikymmenillä ennustettua kauemmaksi. Hiililauhteen tuotantokustannusten laskennassa ei otettu huomioon lainkaan päästökaupan vaikutusta. Tämän hetkinen CO₂-päästöoikeuden hinta on noin 15-20 €/CO₂-tonni, joten se nostaa hiililauhteen tuotantokustannuksia. Tämä jätettiin kuitenkin analyysistä pois sen vuoksi, koska suurin osa maailman hiililauhdevoimaloista ei kuulu päästökaupan piiriin.

Analyysissä kävi myös ilmi se, että aurinkosähkön tuotantokustannukset ovat huomattavasti edullisemmat etelässä kuin pohjoisessa. Puhutaankin aurinkovyömaista (Engl. sunbelt countries), joissa aurinkosähkön tuotanto olisi kaikkein edullisinta. Tähän vyöhykkeeseen osuu eniten auringon säteilyä vuodessa. Suurin osa tuohon vyöhykkeeseen kuuluvista maista on kuitenkin kehitysmaita ja näin ollen näissä maissa ei ole varaa investoida uuteen teknologiaan ilman länsimaiden tai suurten yritysten apua. Kuvaavaa onkin se, että tällä hetkellä vain 9 % asennetusta aurinkosähkökapasiteetista on näissä maissa. [EPIA10]

Analyysissä perehdyttiin myös oppimiskertoimeen aurinkosähkön tuotantokustannuksissa. Sillä on suuri merkitys, koska suuri oppimiskerroin ennustaa nopeaa oppimista ja tällöin on odotettavissa, että tuotantokustannukset alenevat merkittävästi tulevaisuudessa. Oppimiskerroin ei kuitenkaan ole stabiili vaan muuttuu ajan kuluessa. Tässä analyysissä kuitenkin oletettiin yksinkertaisuuden vuoksi, että oppimiskerroin pysyy koko ajan samana. Todellisuudessa oppimiskerroin pienenee, kun tekniikka kaupallistuu ja markkinat saturoituvat. Oppimiskertoimen pienentyminen nostaa suoraan tuotantokustannuksia.

7. YHTEENVETO

Maailman energian käyttö on kasvanut valtavasti viime vuosikymmenten aikana. Uusiutumattomien energialähteiden osuus on yhä energiantuotannossa suuri, mutta viime vuosina on kiinnostus lisääntynyt uusiutuvien energialähteiden käyttöön. Tämä näkyy niiden kapasiteetin kasvuna ja suotuisana hintakehityksenä. Ilmastopoliittiset ratkaisut ovat myös lisänneet mielenkiintoa ja investointeja uusiutuvien energialähteiden saralla. Erilaiset ilmastopöytäkirjat ovatkin arkipäivää nykyään.

Työssä tarkasteltiin uusiutumattomista energialähteistä kolmea tärkeintä: hiiltä, öljyä ja maakaasua. Näiden energialähteiden osuus maailman primäärienergian käytöstä on suuri, sillä ne muodostavat yli 80 % primäärienergian käytöstä. Niiden merkitys on suuri maailman taloudelle ja etenkin öljyn hinta vaikuttaa nykyisin lähes kaikkien ihmisten elämään nostaten jokapäiväisiä kustannuksia. Myös sähköntuotannossa uusiutumattomien energialähteiden osuus on merkittävä, sillä niiden avulla tuotetaan lähes 90 % maailman käyttämästä sähköenergiasta. Etenkin hiili on tärkeää, sillä hiililauhde on yleisin maailmalla käytetty tapa tuottaa sähköä.

Uusiutumattomien energialähteiden lisäksi tarkasteltiin uusiutuvia energialähteitä. Lyhyesti tarkasteltiin ensiksi vesivoimaa, tuulivoimaa sekä bioenergiaa. Kaikkien kolmen energialähteen kapasiteetin kasvu on ollut huimaa 2000-luvun aikana ja ennusteet ovat hyvin suotuisat kapasiteetin kasvun suhteen. Lisäksi näiden energiantuotantomuotojen tuotantokustannukset ovat viime vuosina alkaneet kapasiteetin kasvun myötä laskea. Näiden kolmen lähteen lisäksi tarkasteltiin työn kannalta kiinnostavinta uusiutuvaa energialähdettä: aurinkosähköä. Tällä hetkellä sen maailmanlaajuinen kapasiteetti on vielä melko pieni, mutta kapasiteetin vuotuinen kasvuprosentti on nykyisin 30 %. Kasvun on ennustettu tästä laskevan tulevaisuudessa, mutta seuraavat kaksikymmentä vuotta sen vuosittainen kasvu on hyvin suurta.

Aurinkosähkön kehittämiseen ja sen tuotantotekniikoiden parantamiseen on viime vuosina panostettu huomattavasti. Suurin yksittäinen kustannus aurinkosähkön tuotannossa on aurinkokennot. Ne tehdään nykyisin vielä kiteisestä piistä, joka on melko kallias tuotantomuoto. On kuitenkin ennustettu, että erilaiset ohutkalvotekniikat tulevat ajan myötä korvaamaan kiteisen piin, jolloin tuotantokustannukset laskevat huomattavasti. Lisäksi kysynnän kasvu alentaa suoraan tuotantokustannuksia.

Luvussa kuusi tarkasteltiin aurinkosähkölaitoksen ja hiililauhdevoimalan tuotantokustannusten kehitystä. Tuotantokustannuksille saatiin kiinteät parametrit ja haettiin ajankohta, jolloin aurinkosähkön tuotantokustannukset saavuttavat hiililauhteen tuotantokustannukset. Hajontaa tuloksiin saatiin hiilen hinnan eri ennusteilla. Lähtöarvot syötettiin tähän tarkoitukseen rakennettuun yksikertaiseen Excel-sovellukseen. Hiililauhteen tuotantokustannusten laskentaan käytettiin eri yhtälöä kuin aurinkosähkön tuotantokustannusten laskentaan. Syynä oli se, että aurinkosähkön tuotantokustannusten laskennassa otettiin huomioon oppimiskertoimen vaikutus kustannuksien alenemiseen. Hiililauhteen tuotantokustannuksiin ei enää oppimiskertoimen arvo vaikuta, sillä se on hyvin pitkälle kehittynyt tekniikka.

Hiilen hinnan kehitys on yksi keskeisin tekijä sille, kuinka kauan kestää, että aurinkosähkön tuotantokustannukset kohtaavat hiililauhteen tuotantokustannukset. Mitä nopeammin hiilen hinta nousee sitä nopeammin aurinkosähkön tuotantokustannukset kohtaavat hiililauhteen tuotantokustannukset. Tarkastelussa huomattiin lisäksi se, että aurinkosähkön kapasiteetin kasvu vaikuttaa sen tuotantokustannusten kehitykseen. Kapasiteetin voimakas kasvu vaikuttaa aurinkosähkön tuotantokustannuksiin alentavasti. Syy tähän löytyy oppimiskäyrästä. Oppimiskäyrän suuruus kuvaa melko hyvin sitä, kuinka hyvin tekniikka yleistyy. Mitä halvemmaksi tuotantokustannusten odotetaan kehittyvän ja mitä nopeampaa kehitys on, sitä tehokkaammin tarkasteltavan tekniikan odotetaan yleistyvän.

LÄHTEET

- [Arm01] Armstrong, J. S. (ed.) 2001. Principles of forecasting. University of Pennsylvania. Philadelphia, Pennsylvania, USA. 849 s.
- [Ben07] Beneking, C. 2007. Perspective for industrial development. In: second photovoltaic Mediterranean conference, 19-20 huhtikuuta 2007, Ateena.
- [Ber06] Bergman J-P., Karhumäki T., Keikko T., Komulainen R., Kässä T., Lankila M., Lehtinen H., Partanen J., Poikonen P., Rinne P., Valkelahti S., Ventä O. & Walhström B. 2006. Teknologiaohjelma DENSY – Hajautetun energiantuotannon tulevaisuusskenaariot ja vaikutukset liiketoimintamalleihin. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti 9. 139 s.
- [Bha09] Bhandari, R. & Stadler, I. 2009. Grid parity analysis of solar photovoltaic systems in Germany using experience curves. Solar Energy 83 (2009) 1634-1644.
- [EIA] Energy Information Administration. Biomass characteristics. [WWW]. [Viitattu 1/2010]. Saatavissa: <http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar/renewables/page/biomass/biomasschar.pdf>
- [EIA06] Energy Information Administration. 2006. International energy outlook 2006. Washington, U.S. Department of Energy. 192 s.
- [EIA08a] Energy Information Administration. 2006. World production of primary energy by energy type and selected country groups 1980-2006. International energy annual 2006. [WWW]. [Viitattu 8/2009]. Saatavissa: <http://www.eia.doe.gov/iea/wepbtu.html>
- [EIA08b] Energy Information Administration. 2006. World consumption of primary energy by energy type and selected country groups 1980-2006. International energy annual 2006. [WWW]. [Viitattu 8/2009]. Saatavissa: <http://www.eia.doe.gov/emeu/iea/wecbtu.html>
- [EIA08c] Energy Information Administration. 2006. International electricity consumption. [WWW]. [Viitattu 9/2009]. Saatavissa: <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/electricityconsumption.html>
- [EIA09] Energy Information Administration. 2009. International energy outlook 2009. Washington, U.S. Department of Energy. 274 s.

- [EIA09b] Energy Information Administration. 2009. Annual energy outlook 2009 with projections 2030. U.S. Department of Energy. 221 s.
- [Ele] Elektroniikan laitos. Sähkömagnetiikan osasto. 2008. SMG-4450 Aurinkosähkö. Tampereen Teknillinen Yliopisto. 1. Luento. [WWW]. [Viitattu 8/2009].
- [EREC07a] European Renewable Energy Council & Greenpeace international. 2007. Energy revolution, a sustainable world energy outlook. 95 s.
- [EREC07b] European Renewable Energy Council. 2007. Renewable energy technology roadmap up to 2020. Brussel. 23 s.
- [EREC08] European Renewable Energy Council. 2008. Renewable energy roadmap 20 % by 2020. 23 s.
- [EREC08a] European Renewable Energy Council & Greenpeace international. 2008. Energy revolution, a sustainable global energy outlook. 211 s.
- [EPIA08] European Photovoltaic Industry Association & Greenpeace international. 2008. Solar generation V – 2008, Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020. 73 s.
- [EPIA09] European Photovoltaic Industry Association. 2009. Global market outlook for photovoltaics until 2013. Belgium. 20 s.
- [EPIA10] European Photovoltaic Industry Association. 2010. Unlocking the sunbelt potential photovoltaics. EPIA/ARE/ASIF. 55 s.
- [EWEA09] The European Wind Energy Association. 2009. The Economics of wind energy. 155 s.
- [Ger05] Gerwing, R. 2005. PV Experience curves for the Netherlands. Copernicus Institute, Department of Science, Technology and Society. 66 s.
- [God04] Godfrey, B. (ed.). 2004. Renewable energy. First Edition. United Kingdom 2004, the University of Oxford. 452 s.
- [Har00] Harmon, C. 2000. Experience curves of photovoltaic technology. International institute for applied system analysis. Laxenburg, Austria.
- [IEA00] International Energy Agency. 2000. Experience curves for energy technology policy. OECD, IEA. Paris.

- [IEA03] International Energy Agency. 2003. Renewables for power generation, status & prospects. OECD/IEA. Paris. 189 s.
- [IEA05] International Energy Agency. 2005. Projected costs of generating electricity 2005 update. Paris, OECD/IEA/NEA. 132 s.
- [IEA08] International Energy Agency. 2008. Energy technology perspectives, scenarios & strategies to 2050. IEA/OECD. 643 s.
- [IEA10] International Energy Agency. 2010. Annual energy outlook 2010 with projections 2035. 221 s.
- [IEA10a] International Energy Agency. 2010. Technology roadmap, solar photovoltaic energy. Paris. 43 s.
- [IEA10b] International Energy Agency. 2010. ETSAP, Energy technology systems analysis programme, coal-fired power. IEA ETSAP Technology brief E01 – April 2010. 6 s.
- [Kar05] Karhumäki, T. 2005. Hajautetun sähköntuotannon tekniikoiden kustannukset ja markkinakehitys. Diplomityö. Tampere, Tampereen Teknillinen Yliopisto, sähkötekniikan osasto. 96 s.
- [MOT05] Motiva. 2005. Vesivoima. [WWW.] [Viitattu 1/2010]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/vesivoima
- [Mäk06] Mäkinen, S. & Nokelainen, T. 2006. Näkökulmia teknologisen toimintaympäristön analysointiin. Opetusmoniste. Tampere. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tuotantotalouden osasto. 159 s.
- [Nev06] Nevaranta, T. 2006. Uusien ja kehittyvien energiatuotannon tekniikoiden kaupallistumisen ennakointi. Diplomityö. Tampere, Tampereen Teknillinen Yliopisto, sähkötekniikan osasto. 89 s.
- [OECD03] Organisation for Economic Co-operation and Development. 2003. Technology innovation, development and diffusion. Ranska. 48 s.
- [Par02] Parente, V., Goldemberg J. & Zilles, R. 2002. Comments on experience curves for PV modules. Progress on photovoltaics 10 (8), s. 571-574.
- [Pel07] Latvala, T., Aro-Heinilä, E., Toivonen, E. & Järvinen, E. 2007. Bioenergian tuotanto ja markkinat vuonna 2007 sekä kehitysnäkymät vuoteen 2015. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen rapostteja nro. 205. Helsinki. 71 s.
- [Pop03] Poponi, D. 2003 Analysis of diffusion paths fot photovoltaics technology based on experience curves. Solar energy 74, s. 331-340.

- [REN09] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2009. Renewables global status report 2009 update. Ranska. 31 s.
- [REN10] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2010. Renewables global status report 2010. 78 s.
- [Rog03] Rogers, E. 2003. Diffusion of innovations. Fifth edition. New York, USA. 550 s.
- [Sch04] Schaeffer, G., Alsema, E., Seebregts, A., Beurskens, L., de Moor, H., van Sark, W., Durstewitz, M., Perrin, M., Boulanger, P., Laukamp, H. & Zuccaro, C. 2004. Learning from the sun – analysis of the use of experience curves for energy policy purposes: The case of photovoltaic power. Final report of the photexp project. ECN, Petten.
- [SBI09] Market Insights Beyond Data. 2009 Hydropower energy technologies worldwide: large, small, mini, micro and pico. [WWW]. [Viitattu 11/2009]. Saatavissa: <http://www.sbireports.com/Hydropower-Energy-Technologies-1926640/>
- [Sol01] SOLPROS. 2001. Aurinkoenergian teknologia- ja markkinakatsaus. Tekes-projekti 594/480/00. 31 s.
- [Tar03] Tarjanne R., Luostarinen K. 2003. Sähköntuotantovaihtoehtojen taloudellinen vertailu. Tutkimusraportti EN B-155. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia ja ympäristötekniikan osasto. 18 s.
- [Mäk09] Mäkinen, S. 2009. Teknologiajohtamisen luentokalvot. Teta-1500, teknologiajohtaminen. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tuotantotalouden osasto. Tampere.
- [VTT04] VTT Prosessit. 2004. Energia Suomessa. 3. painos. Helsinki, Edita Prima Oy. 396 s.
- [Väk05] Väkeväinen, J. 2005. Tiedonkeruu Viitasaaren uusiutuvan energian hankkeen pilottikohteessa. Pro gradu-tutkielma. Jyväskylä, Jyväskylän Yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos. 116 s.
- [WWEA09] World Wind Energy Association. 2009. World wind energy report 2008. Germany. 16 s.

LIITE 1: Energiayksiköiden väliset muuntokertoimet

Yksikkö	PJ	Mtoe	TBtu	TWh
PJ	1,000	0,024	0,948	0,278
Mtoe	41,868	1,000	39,680	11,63
TBtu	1,055	0,025	1,000	0,293
TWh	3,600	0,086	3,412	1,000

LIITE 2: Annuiteettitekijä

Annuiteettimenetelmässä investoinnin hankintameno jaetaan pitoaikaa vastaaville vuosille yhtä suuriksi pääomakustannuseriksi, annuiteeteiksi. Annuiteetti sisältää pääoman poiston ja pääomasta maksettavan koron. Investoinnin vuotuinen annuiteetti voidaan laskea kertomalla investoinnin hankintameno annuiteettitekijällä a , joka voidaan laskea alla esitetyllä yhtälöllä. Esimerkiksi 5 %:n laskentakorolla ja 20 vuoden takaisinmaksuajalla annuiteettitekijäksi saadaan 0,0802.

$$a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

missä

- a on annuiteettitekijä
- i on laskentakorkokanta
- n on aika vuosissa